



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

3D TISKÁRNA

3D PRINTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Ctibor

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radoslav Cipín, Ph.D.

BRNO 2016



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jiří Ctibor

ID: 146799

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

3D tiskárna

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rešerši současných technologií 3D tiskáren.
2. Proveďte diskuzi problematiky využití dostupných řídicích obvodů 3D tiskáren.
3. Navrhnete a vyrobte funkční prototyp řídicí jednotky pro 3D tiskárnu.
4. Proveďte testování vyrobeného vzorku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. Brno: VUTUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003- 6.
- [2] Hausman K. K., 3D Printing For Dummies . For Dummies, 2014. 384 s. ISBN: 1118660757.
- [3] Bell. Ch. Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer. Apress, 2014. 528 s. ISBN 1430268093.

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Radoslav Cipín, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá tematikou 3D tisku, konkrétně výrobou hardwaru řídicí a výkonové elektroniky pro tiskárnu s technologií FDM. Práce po jejím prostudování nabízí čtenáři přehled o základních technologiích 3D tisku. Více pak získá informací o používané technologii FDM, včetně popisu všech důležitých komponent. Hluběji je rozebrána problematika elektrických pohonů. V případě zájmu je součástí diplomové práce i schéma zapojení řídicí elektroniky, podle které je možné elektroniku zkonstruovat. Z praktických důvodů dokumentace neobsahuje podklady pro navržené desky plošných spojů, ty je možné obdržet po kontaktování autora práce. K řízení tiskárny je použit jeden z dostupných open source řídicích softwarů. Problematika mechaniky včetně mechanického návrhu je řešena v jiné paralelní diplomové práci studentem Fakulty strojního inženýrství.

Abstract

Master thesis deals with topic about 3D printers, concretely making hardware of control and power electronic for FDM 3D printer. The work could offer an overview about basic 3D printing technologies after reading. More information could be read about FDM technology, which is used in our printer, also with description of all important components. The furthest is discussed about electronic drives. If reader is interested in this topic, part of this thesis is schematic design of control electronics, which can be used to build own boards. Design of printed circuit boards is not present in attachment and can be obtained by contacting the author. For own control is used one of the open source control software. Mechanical problems and also mechanical design is done in parallel thesis by other student of Faculty of mechanical engineering.

Klíčová slova

3D tiskárna, FDM, FFF, RepRap, Řídicí elektronika, Rapid Prototyping

Keywords

3D printer, FDM, FFF, RepRap, Control electronics, Rapid Prototyping

Bibliografická citace

CTIBOR, J. Návrh 3d tiskárny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 106 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Radoslav Cipín, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma **3D tiskárna** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Radoslavu Cipínovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce. Stejně tak Ing. Daliboru Červinkovi za doplňující rady k návrhu desek plošných spojů.

V Brně dne

Podpis autora



Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
I ÚVOD	17
2 HISTORIE 3D TISKU	18
3 TECHNOLOGIE 3D TISKU	19
3.1 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ 3D TISKU	20
3.1.1 SELECTIVE LASER SINTERING (LS)	22
3.1.2 STEREOGRAFIE (SL).....	23
3.1.3 DIGITAL LIGHT PROCESSING	24
3.1.4 BINDER JETTING (BJ).....	25
3.1.5 PHOTOPOLYMER JETTING (PJ)	26
3.1.6 MATERIAL JETTING (MJ)	28
3.1.7 ELECTRON BEAM MELTING (EBM).....	28
4 FUSED DEPOSIT MODELING.....	30
4.1 TISKOVÁ HLAVA.....	31
4.2 VYHŘÍVANÁ NOSNÁ DESKA.....	33
4.3 VYHŘÍVANÝ PROSTOR	34
4.4 MATERIÁLY FILAMENTU	35
4.4.1 PLA – POLYLACTIC ACID	35
4.4.2 ABS - ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE	36
4.4.3 NYLON	36
4.4.4 PVA – POLYVINYL ALCOHOL.....	37
4.4.5 HIPS – HIGH-IMPACT POLYSTYRENE	37
5 PROJEKT REPRAP.....	38
5.1.1 REPRAP 3D TISKÁRNY	39
6 PRŮZKUM TRHU KOMERČNÍCH 3D TISKÁREN S TECHNOLOGIÍ FDM.....	40
6.1 VYBRANÉ KOMERČNÍ NÍZKONÁKLADOVÉ 3D TISKÁRNY S TECHNOLOGIÍ FDM NA TRHU	41
6.2 PROFESIONÁLNÍ 3D TISKÁRNY NA TRHU	44
7 PROCES 3D TISKU	45
7.1 PROCES 3D TISKU KROK ZA KROKEM	46
8 ŘÍZENÍ 3D TISKÁRNY.....	48
8.1 ŘÍZENÍ NÍZKONÁKLADOVÝCH 3D TISKÁREN	48
8.1.1 TOPOLOGIE ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ	49



8.2 HOST	49
8.3 KLIENT.....	50
8.3.1 KLIENT SOFTWARE	51
8.4 INTERFACE	52
8.4.1 INTERFACE RAMPS.....	52
9 POHONY CNC STROJŮ.....	54
9.1 POHON S AC SYNCHRONNÍM STROJEM	54
9.2 POHON S KROKOVÝM MOTOREM.....	56
9.2.1 INTEGROVANÝ POHON KROKOVÉHO MOTORU.....	56
9.2.2 VLASTNÍ REZONANČNÍ FREKVENCE SOUSTAVY POHON – ZÁTĚŽ	57
9.2.3 TEORIE KROKOVÝCH MOTORŮ.....	58
10 PARAMETRY KONSTRUOVANÉ TISKÁRNY.....	70
11 HLAVNÍ KOMPONENTY TISKÁRNY	71
11.1 POHONY OS	71
11.2 EXTRUDÉR	73
11.2.1 ELEKTRICKÉ PARAMETRY EXTRUDÉRU	74
11.3 VYHŘÍVANÁ DESKA	75
11.4 VYHŘÍVÁNÍ KOMORY	76
11.5 SÍŤOVÝ NAPÁJECÍ ZDROJ.....	76
12 NÁVRH INTERFACE.....	78
12.1 DRIVER KROKOVÝCH MOTORŮ POHONŮ OS	78
12.1.1 PŘIPOJENÍ K CPU	79
12.1.2 NASTAVOVÁNÍ MAXIMÁLNÍHO FÁZOVÉHO PROUDU	79
12.2 DRIVER KROKOVÝCH MOTORŮ POHONŮ EXTRUDÉRŮ	83
12.2.1 NASTAVOVÁNÍ MAXIMÁLNÍHO FÁZOVÉHO PROUDU	83
12.3 NAPÁJENÍ TOPNÝCH TĚLES	86
12.3.1 DIMENZOVÁNÍ NAPÁJENÍ VYHŘÍVANÉ DESKY	87
12.3.2 DIMENZOVÁNÍ NAPÁJENÍ VYHŘÍVÁNÍ TRYSEK	87
12.3.3 DIMENZOVÁNÍ NAPÁJENÍ VYHŘÍVÁNÍ KOMORY	87
12.4 NAPÁJENÍ VENTILÁTORŮ.....	88
12.5 ANALOGOVÉ VSTUPY	88
12.6 DIGITÁLNÍ VSTUPY.....	89
12.7 MODUL LCD DISPLEJE S OVLÁDÁNÍM.....	90
12.8 PODRUŽNÉ NAPÁJECÍ ZDROJE PRO ELEKTRONIKU.....	91
13 TESTOVÁNÍ VYROBENÉ ELEKTRONIKY.....	93
13.1 MĚŘENÍ POHONŮ.....	93
13.2 VÝKONOVÉ TRANZISTOROVÉ SPÍNAČE.....	94
ZÁVĚR.....	97



LITERATURA	98
PŘÍLOHY	100
A. MODUL POHONU OS	100
B. MODUL POHONU EXTRUDÉRU	100
C. MODUL VÝKONOVÝCH SPÍNAČŮ	101
D. MODUL VSTUPŮ PRO SENZORY	101
E. ZÁKLADNÍ DESKA.....	102
F. KOMPLETNÍ PODOBA SESTAVENÉ ELEKTRONIKY.....	103
G. PŘEDNÍ POHLED 3D MODELU TISKÁRNY	104
H. VRCHNÍ POHLED 3D MODELU TISKÁRNY	105



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 - přehled a porovnání základních technologií 3D tisku [2].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2 - Selective Layer Sintering [2].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3 – Stereolitografie [2]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4 - Digital Light Processing.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 5 - Binder Jetting [2]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 6 – Fotopolymer Jetting [2].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 7 - Electron Beam Melting [2].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 8 - Fused Deposit Modeling [2].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 9 – kartézský souřadný systém a systém delta [9]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 10 - schéma extrudéru FDM 3D tiskárny [10]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 11 – zvolený extrudér Bulldog a E3D V6 hot end.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 12 – „cracking“ efekt ABS materiálu [10]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 13 – vyhřívaná nosná deska.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 14 - 1kg cívka filamentu.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 15 - RepRap stroj číslo jedna – RepRap Darwin [10].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 16 – tiskárna Ultimaker 2 Extended</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 17 - tiskárna Makerbot Replicator Z18</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 18 - tiskárna Code-P West Extreme 2000.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 19 - tiskárna Leapfrog Creatr XL</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 20 - tiskárna Big rep one v3.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 21 - tiskárna re:3D Gigabot XL 3.0.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 22 - tiskárna Sicnova JCR1000.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 23 - profesionální tiskárna EOS EOSINT P 800</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 24 - proces 3D tisku od digitálního modelu k fyzickému výrobku</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 25 – síť mesh 3D modelu.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 26 - slicing - model rozdělen do vrstev, hexagonální výplň.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 27 - principiální blokové schéma řídicího systému nízkonákladových 3D tiskáren</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 28 - Arduino MEGA.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 29 - RAMPS 1.4 bez stepper driver modulů [10].....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 30 - napětí U_{GS} při sepnutí tranzistoru na interface RAMPS</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 31 – blokové schéma vektorového řízení harmonického stroje [11]</i>	<i>55</i>



<i>Obr. 32 - blokové schéma integrovaného pohonu s krokovým motorem</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 33 - vliv vlastní rezonanční frekvence soustavy na synchronizmus krokového motoru [11].</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 34 - dynamická momentová charakteristika bipolárního krokového 2f motoru</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 35 - fázový proud motoru při relativně malé frekvenci pulzů</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 36 - fázový proud motoru při relativně velké frekvenci pulzů</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 37 - Variable reluctance [11]</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 38 – krokový motor PM [11]</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 39 - hybridní krokový motor [11]</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 40 – porovnání způsobů napájení krokových motorů</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 41 - momentová charakteristika motoru SX23-2727 [32]</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 42 - Zapojení do hvězdy a trojúhelníka 3f krokového motoru [17]</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 43- způsoby buzení krokových motorů [11].....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 44 - plný krok 1f buzení [26].....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 45 - plný krok 2f buzení [26].....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 46 - poloviční krok [26]</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 47 - paralelní kinematika os X a Y.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 48 - hot end Diamond</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 49 - E3D Chimera s cold endy Bulldog</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 50 - sestavený hot end E3D V6</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 51 - krokový motor NEMA 17 s planetovou převodovkou</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 52 - MK2B vyhřívaná nosná deska</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 53 - průmyslový napájecí zdroj 24 V, 700 W.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 54 - TB6600HG.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 55 – jeden 4 kvadrantový měnič, plný most, full bridge, H-bridge, H-můstek</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 56 – schéma obvodového řešení pro nastavení ref. napětí V_{ref}.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 57 - LM4040 referenční zapojení [15].....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 58 - DRV8825PWP</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 59 - LM4040 referenční zapojení [15].....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 60 - jedno kvadrantový snižující měnič.....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 61 - BTS716G-DS</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 62 – obvod analogového vstupu.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 63 - Binární snímače polohy s kombinacemi výstupů NO, NC, PNP, NPN [33].....</i>	<i>89</i>



<i>Obr. 64 - obvod digitálního vstupu</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 65 - FULL GRAPHIC SMART CONTROLLER s grafickým displejem 128×64 [10]</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 66 - měření pohonů os; žlutá - napětí na napájecím pinu int. obvodu; fialová, růžová - fázové proudy motoru</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 67 - měření pohonů extrudérů; žlutá - napětí na napájecím pinu int. obvodu; fialová, růžová - fázové proudy motoru.....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 68 – záznam průběhu napětí U_{GS} při spínání tranzistoru</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 69 - příloha A - modul pohonu os</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 70 - příloha B - modul pohonu extrudérů</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 71 - příloha C - modul výkonových spínačů</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 72 - příloha D - modul vstupů pro senzory</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 73 - příloha E - základní deska</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 74 - příloha F - kompletní podoba sestavené elektroniky.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 75 - příloha G - přední pohled na 3D model tiskárny</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 76 - příloha H - vrchní pohled na 3D model tiskárny.....</i>	<i>105</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – základní vlastnosti filamentu PLA.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 2 - základní vlastnosti filamentu ABS.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 3 - základní vlastnosti materiálu PVA.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 4 - porovnání parametrů jednotlivých typů pohonů.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 5 – typy vinutí 2f krokových motorů.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 6 - budiče krokových motorů.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 7 - pokles momentu krokového motoru vlivem metod mikrokrokování.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 8 – kalkulace spotřeby při přípravné fázi tisku - zahřívání.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 9 - odhad spotřeby při tisku.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 10 - parametry spínaného regulátoru napětí LM2679.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabulka 11 - parametry lineárního regulátoru napětí LM1085.....</i>	<i>92</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

R_a	[Ω]	Odpor vinutí motoru
L_a	[H]	Indukčnost vinutí motoru
τ	[s]	Časová konstanta
M_S	[Nm]	Statický zatěžovací moment
J_{mot}	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti rotoru
J_o	[kg·m ²]	Redukovaný moment setrvačnosti
J_{celk}	[kg·m ²]	Celkový moment setrvačnosti
M_{mot}	[Nm]	Moment motoru
U_{R1}	[V]	Napětí na rezistoru R_1
R_1	[Ω]	Rezistor R_1
R_2	[Ω]	Rezistor R_2
I_0	[A]	Proud nezatíženého děliče
U_{ref}	[V]	Napětí referenčního vstupu driveru
$I_{f,\text{stf,max}}$	[A]	Maximální hodnota středního fázového proudu motoru
I_{ef}	[A]	Efektivní hodnota proudu
$I_{V\text{REF}}$	[μ A]	Proud odebíraný referenčním vstupem V_{ref}
R_{NF}	[Ω]	Bočník pro snímání fázového proudu motoru
$I_{f,\text{max}}$	[A]	Maximální hodnota fázového proudu
U_{R12}	[V]	Napájecí napětí děliče
I_{load}	[A]	Zatěžovací proud regulátoru
U_S	[V]	Napájecí napětí regulátoru
ΔP_R	[W]	Ztrátový výkon na rezistoru
R_i	[Ω]	Vnitřní odpor
P_N	[W]	Jmenovitý výkon
U_N	[V]	Jmenovité napětí
I_N	[A]	Jmenovitý proud
ω	[rad·s ⁻¹]	Úhlová rychlost
ε	[rad·s ⁻²]	Úhlové zrychlení
a	[m·s ⁻²]	Lineární zrychlení



t	[s]	Čas
J	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti
r	[m]	Poloměr
m	[kg]	Hmotnost
g	[m·s ⁻²]	Tíhové zrychlení
v	[m·s ⁻¹]	Lineární rychlost
M	[Nm]	Točivý moment
ΔP_T	[W]	Ztrátový výkon vedením na tranzistoru
C_1	[F]	Kapacita hradla tranzistoru
C_2	[F]	Kapacita hradla tranzistoru
s	[V·s ⁻¹]	Strmost nárůstu napětí
s_1	[V·s ⁻¹]	Strmost nárůstu napětí při kapacitě C_1
s_2	[V·s ⁻¹]	Strmost nárůstu napětí při kapacitě C_2
R_G	[Ω]	Odpor připojený ke <i>gate</i> tranzistoru

Zkratky

2D	Two Dimensional – dvojrozměrný
3D	Three Dimensional – trojrozměrný
1f, 2f, 3f, 5f	Jedno, dvou, tří a pětifázový
HW	Hardware
CAD	Computer Aided Desing - počítačem podporovaný design
CAM	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba
CCW	Counter clockwise - proti směru hodinových ručiček
CNC	Computer Numerical Control - počítačové číslicové řízení
CW	Clockwise - ve směru hodinových ručiček
DPS	Deska plošných spojů
GPIO	General purpose input output - obecné vstupy a výstupy
GPL	General public licence
I ² C	Inter-Integrated Circuit – sériová komunikační sběrnice
IO	Integrovaný obvod, nebo také Input Output
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Tranzistor – nejznámější typ unipolárních tranzistorů



NTC	Negative temperature coefficient - záporný teplotní koeficient, teplotní čidlo
PC	Personal Computer – osobní počítač
PID	Proportionálně Integračně Derivační spojitý regulátor
pps	Pulses per second - pulzů za sekundu
PWM	Pulse Wide Modulation – pulzně šířková modulace
Ra	Střední aritmetická odchylka profilu, veličina pro posuzování drsnosti povrchu
RAMPS	Reprap Arduino Mega Pololu Shiled
SPI	Serial Peripheral Interface – sériová komunikační sběrnice
SCI	Serial Communicating Interface – sériová komunikační sběrnice
SMD	Surface Mount Device – elektronická součástka určená k povrchové montáži SMT
SMT	Surface Mount Technology
STL, STEP, STP	Přípona standardizovaného digitálního 3D formátu
SW	Software
TTL	Tranzistor Tranzistor Logic
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter – univerzální asynchronní přenos, klasická „sériová linka“
VF	Vysoko frekvenční

Pojmy

filament	Materiál do tiskáren FDM ve formě plastového drátu
mesh	Mesh síť je v 3D grafice používána jako základní typ objektů, pomocí sítí jsou popsány 3D modely v digitálním světě. Jedná se vlastně o množinu bodů v prostoru navzájem spojených.
G-kód	Je formát instrukcí a programu pro programování CNC strojů, definovaný normou ČSN ISO 6983/1
bootloader	Část kódu v mikrokontroléru, která umožňuje programování CPU desky bez použití externího programovacího nástroje, například v případě Arduino platformy pomocí periferie sériové komunikace UART s využitím převodníku USB>UART



1 ÚVOD

Technologie 3D tisku je v současné době velmi rapidně se rozvíjející metodou Rapid Prototyping s poměrně velkým potenciálem. Pracuje na zcela opačném principu oproti konvenčním metodám Rapid Prototyping, nedochází při ní k odebrání materiálu, nýbrž k neustálému přibývání materiálu (aditivní metoda). Díky schopnostem reprodukování trojrozměrných objektů přináší tato technologie hojné využití nejen ve vědě, ve vzdělávání, ale také v domácnostech, v průmyslu, v designu, na středních a vysokých školách k tvorbě výukového materiálu, v archeologii, pro výrobu složitých matematických tvarů, v lékařství a v dalších nejrozumnějších oblastech lidských činností.

Pomocí 3D tiskáren lze vyrábět prototypy, náhradní díly podle aktuální poptávky zákazníků, nebo jiné věci, které je třeba rychle vyrobit a zkompletovat. Malý, klidně složitý objekt zabere méně než hodinu tisku a obdržený výsledek je úžasný: pevný, odolný, velmi lehký a přesto levný výrobek. Cena PLA plastu se dnes pohybuje okolo 30 \$/kg a jeden kilogram je spousta materiálu na tisk několika malých objektů. Veliká všestrannost této technologie způsobila její rozmach i v komerční sféře. Dnes existuje na trhu celá řada 3D tiskáren od různých výrobců s cenami v rozmezí od 300 \$ do 1500 \$ a samozřejmě i víc. Dají se koupit hlavně po internetu, v dnešní době se však objevuje stále více kamenných prodejen. 3D tisk otevírá nové možnosti ve výrobě prototypů, které zde nikdy předtím nebyly [1].

Díky této perspektivní budoucnosti byl vybrán 3D tisk jako téma diplomové práce. Konkrétně tato práce se zabývá návrhem a zhotovením řídicí elektroniky pro 3D tiskárnu používající technologii Fused Deposition Modeling (dále již jen FDM). To vyžaduje poměrně velké znalosti z teorie 3D tisku, proto je z počátku práce provedena obsáhlá rešerše, ale také znalosti z více technických oborů od mechaniky, přes elektrotechniku až po informační technologie. Mechanické záležitosti týkající se konstrukce tiskárny řeší paralelně jiná diplomová práce studenta Ústavu výrobních strojů a robotiky na Fakultě strojního inženýrství. Na základě těchto dvou prací bude po sehnání dostatek potřebných finančních prostředků navržena tiskárna zkonstruována. Pro řízení tiskárny je použit dostupný a optimalizovaný open source software.

První část práce je teoretická a zahrnuje rešerši na technologie 3D tisku včetně jejich základních popisů, principů a vlastností. Hluběji je pak rozebrána technologie FDM, která je v konstruované tiskárně použita, jsou popsány její základní a potřebné komponenty, používané materiály a také je prozkoumán trh s tiskárnami využívající tuto technologii. Dále je pak provedena rešerše na téma řízení 3D tisku, zahrnující postup při tvorbě trojrozměrného objektu metodou 3D tisku, popis open source řídicích systémů nízkonákladových tiskáren, hlouběji je pak z důvodů oborového zaměření rozebrána problematika pohonů CNC strojů, mezi něž se 3D tiskárny dají zařadit, včetně popisu konstrukce a požití krokových motorů.

Druhá část práce se zaměřuje na praktickou stránku konstrukce, je proveden návrh a výběr použitých komponent tiskárny. Na základě vybraných komponent tiskárny je proveden schematický návrh a návrh desek plošných spojů. Následně jsou desky vyrobeny profesionální firmou, vlastnoručně osazeny a oživeny. Závěrečným bodem diplomové práce je testování a měření vyrobené elektroniky. Výsledky jsou pak uvedeny v poslední kapitole.



2 HISTORIE 3D TISKU

Historie 3D tisku se začíná psát už v sedmdesátých letech dvacátého století, kdy byly prováděny prvotní experimenty. K menšímu rozšíření došlo později v osmdesátých letech, avšak to byla technologie stále velmi drahá a tím byla omezena pouze pro profesionální použití. Snad nejdůležitějším milníkem v oblasti 3D tiskáren jsou léta 2004-2005, kdy byl Adrianem Bowyerem, doktorem na Universitě v Bathu, založen projekt RepRap. Ideou projektu bylo sestavit 3D tiskárnu, která bude schopna vytisknout co nejvíce dílů, potřebných k jejímu sestavení. Odtud vyplývá název projektu Rep-Rap. Největší rozmach nízkonákladového 3D tisku nastal v roce 2009. Byl zapříčiněn zprvu díky vypršení patentů firmy Stratasys na technologii FDM a zadruhé díky rozšíření open-source projektů, především projektem RepRap. Díky těmto projektům si dnes může tuto technologii dovolit stále více lidí, což má za následek tak rapidní růst tohoto oboru. Největší omezení těchto běžných RepRap tiskáren je velikost výrobního prostoru přibližně 20×20×20 cm.

V únoru roku 2013 byla slavnostně otevřena laboratoř 3D tisku organizace Mezinárodního Centra Teoretické Fyziky (ICTP) v Itálii, určená k propagaci, podpoře a výuce vědců této nové technologie. K ukázce schopností technologie, přestříhl ředitel ICTP Fernando Quevedo při kolaudaci vstupní pásku nůžkami, vytisknutými na jedné z tiskáren v laboratoři [1].



3 TECHNOLOGIE 3D TISKU

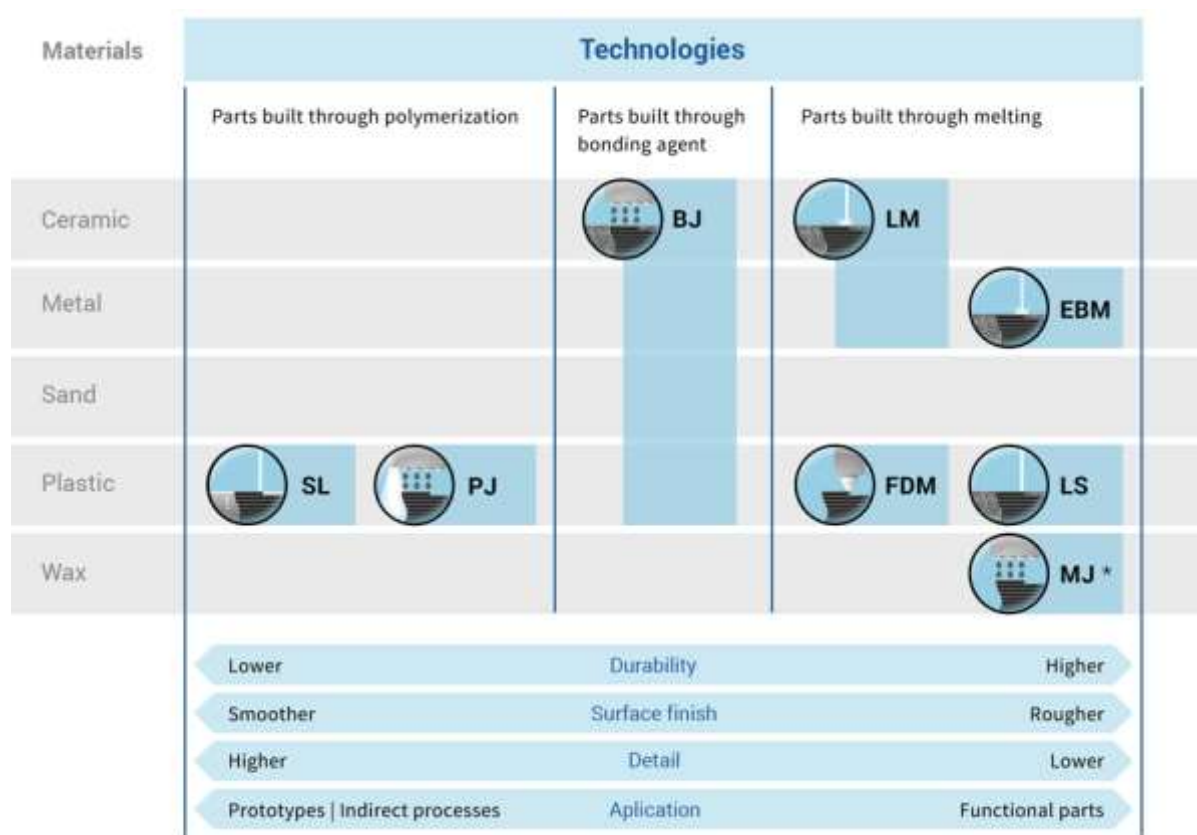
3D tisk patří mezi nekonvenční metody Rapid Prototyping. Je to proces vytváření trojrozměrných objektů nejrůznějších tvarů podle digitálního vzoru (3D modelu). 3D tisk je aditivní proces, při němž jsou jednotlivé vrstvy o různých tvarech systematicky kladeny na sebe, vytvářejíc tak trojrozměrný objekt. To staví tuto technologii to úplného principiálního rozdílu od ostatních metod Rapid Prototyping, jako je například frézování nebo soustružení. Tyto zmiňované metody patří mezi subtraktivní procesy, tedy procesy založené na odebírání materiálu z výchozího polotovaru.

Aditivní procesy mohou být využívány po celou dobu života daného produktu a to už od jeho zrodu při vývoji (Rapid Prototyping), po samotnou plnohodnotnou výrobu (rapid manufacturing), až po povýrobní úpravy, ale také pro výrobu nástrojů, náhradních dílů apod. V dnešní době se tato technologie využívá ve spoustě oblastí lidské činnosti a to nejen ve vědě a průmyslu, například také ve šperkařství, obuvnictví, průmyslovém designu, architektuře, inženýrství a konstrukci, automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, zubním a lékařském průmyslu, vzdělávání, geografických informačních systémech, civilním inženýrství a ve spoustě dalších profesionálních oblastech, každým rokem přibývajícími [1].

Dnes je známo několik různých technologií 3D tisku, z nichž nejrozšířenější je technologie FDM, někdy označovaná také jako FFF (Fused Filament Fabrication). Je to zároveň technologie nejjednodušší, což ji předurčovalo k tak velké popularizaci.

3.1 Přehled technologií 3D tisku

Všechny technologie 3D tisku jsou založeny na principu rozložení trojrozměrného modelu pomocí CAM procesoru na jednotlivé tenké vrstvy, které jsou následně ve výrobním prostoru tiskárny specifickým způsobem sestaveny na sebe do reálného výsledného objektu. Následující obrázek představuje základní technologie 3D tisku podle používaných materiálů a způsobů jejich vytvrzování.



Obr. 1 - přehled a porovnání základních technologií 3D tisku [2]

Přehled a základní popis technologií 3D tisku, čerpáno z [2] [3] [4]:

- **SLS – Selective Laser Sintering (LS)** – technologie založená na principu zapékání práškového materiálu laserovým paprskem, levný stavební materiál, velké pořizovací náklady stroje, používá se plastový prášek.
- **Laser Melting – (LM)** – totožná technologie jako SLS, používá se však keramický nebo kovový prášek.
- **SLA – Stereolitografie (LS)** – nejstarší technologie vyvinutá v roce 1986, principem je vytvrzování tekutého fotopolymerního kompozitu bodovým laserovým UV paprskem, univerzální technologie.

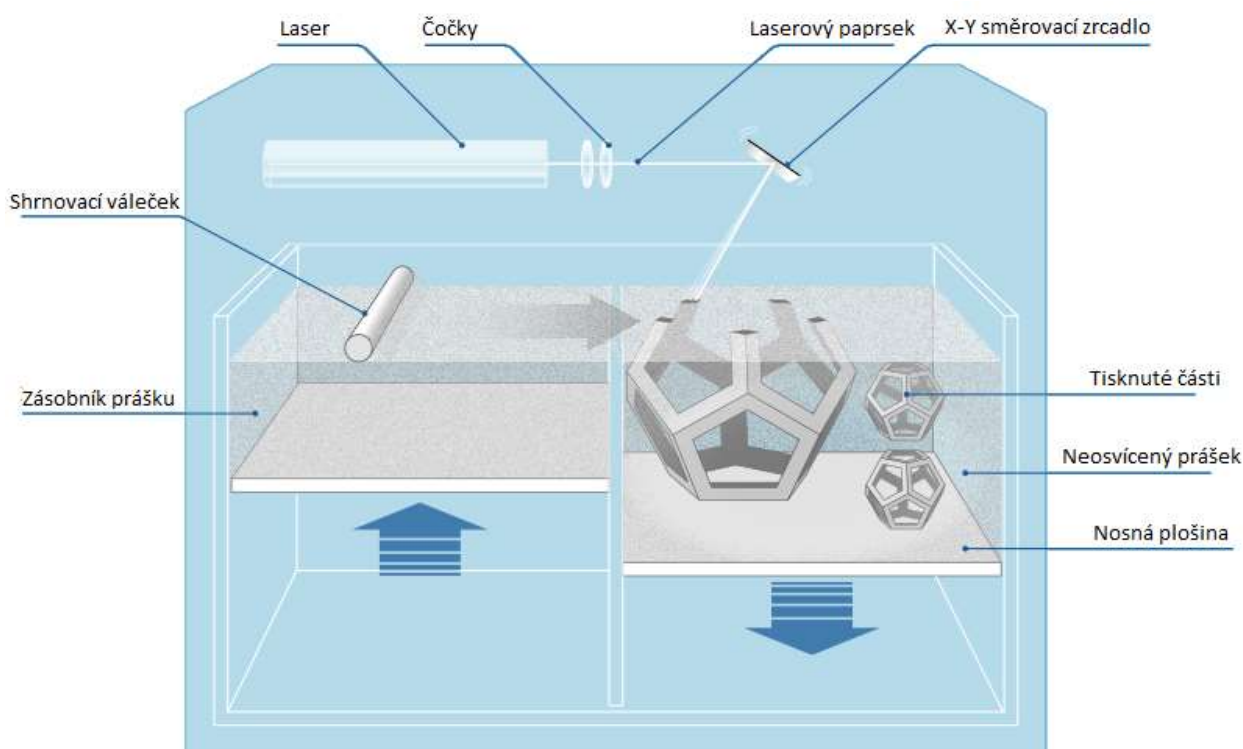


- **DLP – Digital light processing** – moderní technologie založená na principu nasvícení fotopolymery UV projekcí modelového řezu, univerzální a bezodpadová technologie, omezená životnost modelu.
- **Binder Jetting (BJ)** – práškový materiál je nanášen po tenkých vrstvách a je spojován pojivem, které je dávkováno z tiskových hlav (podobných inkoustové tiskárně), nekvalitní povrch modelu, nutná následná povrchová úprava.
- **LOM – Laminated Object Manufacturing** – model je sestavován z vrstev vyříznutých z plastových fólií tloušťky 0,165 mm, které jsou navzájem plošně slepovány. Velké množství zbytků, ale kvalitní povrch vodorovných ploch.
- **FDM – Fused Deposit Modeling** – nejrozšířenější technologie 3D tisku, fungující na principu nanášení tenké vrstvy tryskou roztaveného materiálu. Pro vyklenuté struktury jsou nutné podpory. Možnost použití dvou a více materiálů – hlavní a podpůrný, nebo vícebarevný tisk.
- **Photopolymer Jetting (PJ)** – (PolyJET Matrix) – fotopolymer je vytlačován tiskovými hlavami a následně je vytvrzován UV zářením, dva stavební materiály – stavební a podpůrný. Tloušťka vrstvy 0,016 mm, velmi kvalitní povrch modelu, omezená životnost modelovacího materiálu na 1 rok, odstraňování podpůrného materiálu tlakovou vodou.
- **Material Jetting (MJ)** – (Multi Jet Modeling) vosk nebo jiný termoplastický materiál je vytlačován tiskovou hlavou jako u FDM, používá se stavební a podpůrný materiál s různou teplotou tání, odstranění podpůrného materiálu nahřátím modelu.
- **Thermoplastic inkjet with milling** – kombinace vytlačování termoplastického materiálu s horizontálním frézováním, velmi přesná technologie vhodná pro odlévání metodou ztraceného modelu.
- **EBM – Electron beam melting (BM)** – velmi drahá a díky tomu méně rozšířená technologie, vynikající svojí velikou přesností tisku a dobrými technickými vlastnostmi modelů. Používá usměrněný tok elektronů směřovaný do tiskového materiálu, nejčastěji titanového prachu, nacházejícím se ve vakuu.
- **LMD - Laser Metal Deposition** – technologie představená v nedávné době japonskou společností Toshiba, měla by přinášet až 10 krát větší rychlost tisku než u stávající Selective Laser Sintering (Melting). Práškový materiál je dávkován speciální tryskou do velmi malé oblasti a ihned je spékán laserovým paprskem. Práškový materiál může být například železo nebo nerezová ocel [24].

3.1.1 Selective Laser Sintering (LS)

Nebo také Selective Laser Melting, česky selektivní spékání laserem je technologie 3D tisku vyvinutá v polovině osmdesátých let vědci z texaské univerzity v Austinu, kteří následně založili společnost DTM, jenž tyto tiskárny vyráběla. V roce 2001 byla společnost koupena konkurenční firmou 3D Systems. Rozdíl mezi LS a LM spočívá v tom, že Laser Sintering bývají označovány technologie pracující s plastovým práškem, u Laser Melting se používá keramický a kovový prášek [5] [6].

Princip tisku spočívá v tavení velmi jemného prášku výkonným laserem. Prášek je válcem ze zásobníku dopravován do výrobního prostoru po rovnoměrných vrstvách o tloušťce několika mikrometrů řádově $10 \div 100 \mu\text{m}$. Prášek je vytvrzován pouze v místech, kde je na určitou dobu osvětlen laserem. V neosvětlených místech zůstává v původním stavu a tvoří tak podpůrný materiál, který je po skončení tisku velmi jednoduše odstraněn a lze ho použít pro další cyklus. Tisk probíhá v inertní atmosféře, po vytvoření jedné vrstvy se nosná deska v ose Z sníží o hodnotu odpovídající velikosti jedné vrstvy a následně je nanесena válcem další vrstva surového prášku pro následující spékání [5] [6].



Obr. 2 - Selective Layer Sintering [2]

SLS technologie je velmi ekonomický způsob 3D tisku. Výhody tohoto principu jsou možnost použití přebytečného materiálu při dalším tisku, čímž se sníží náklady na tisk. Pomocí barevných příměsí je možno plnobarevného tisku. Technologie vyniká hlavně svojí přesností tisku a to až na několik desítek mikrometrů. Rychlost této technologie je v závislosti na složitosti



geometrie vrstev u dnešních tiskáren v rozmezí $1 \div 5$ l/h. Tento způsob 3D tisku se například používá pro výrobu kostních a zubních implantátů [5] [6].

Charakteristiky / omezení [2]

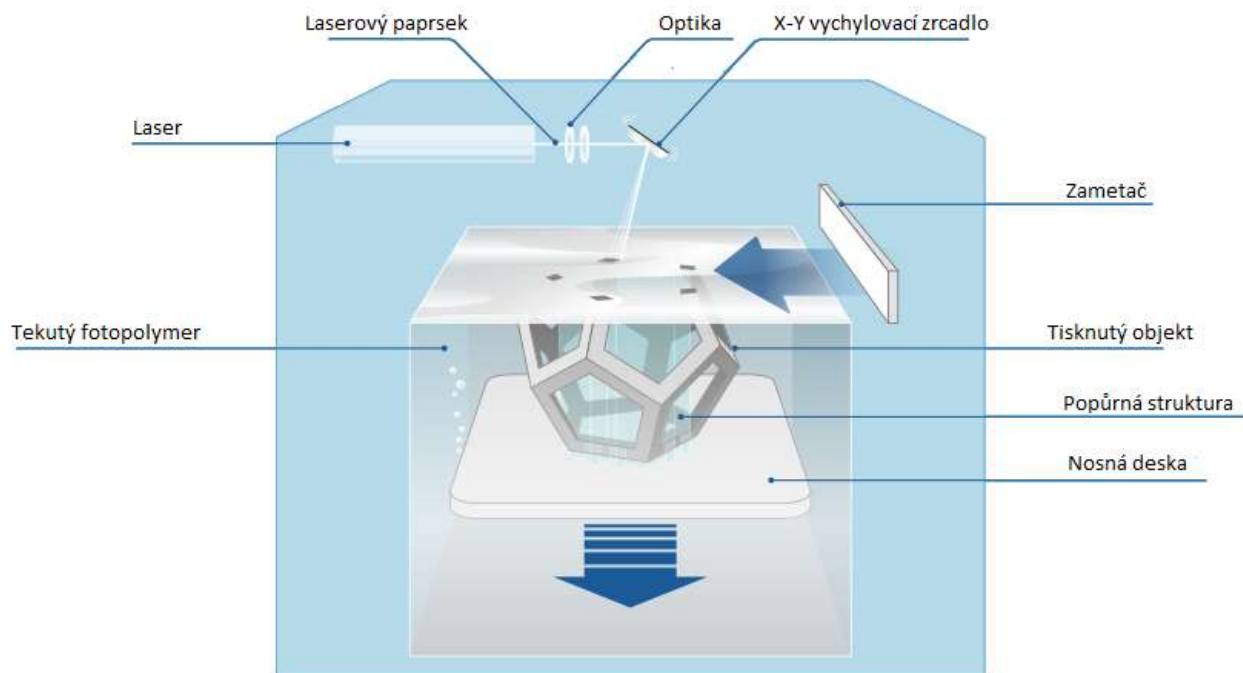
- Maximální výrobní prostor $550 \times 550 \times 750$ mm
- Rozlišení 0.15 mm
- Typická tolerance $\pm 0,25$ mm (i vyšší za jistých povýrobních úprav)
- Minimální tloušťka vrstvy 0,1 mm

Praktické využití [2]

- Prototypy
- Fixtury
- Malosériová výroba

3.1.2 Stereografie (SL)

Ve zkratce bývá označovaná také jako SLA a je nejstarší technologií 3D tisku. Byla patentována již roku 1986. Ve své podstatě funguje na podobném principu jako SLS. Vstupním médiem je však UV zářením tvrditelná fotopolymerická pryskyřice v tekutém stavu, která je působením bodového UV laseru ztvrdována po vrstvách ve tvaru řezů modelu. V místech osvětlení pryskyřice ztuhne, po vytvrzení celé vrstvy se nosná deska posune dolů o hodnotu rovné rozlišení jedné vrstvy. Objekt je opět obklopen tekutou pryskyřicí a je připraven pro osvětlení další vrstvy. Při stavbě složitějších modelů je společně s hlavním modelem nutné vytvářet dočasné podpory, které se po zhotovení mechanicky odstraňují. Mezi výhody Stereolitografie patří možnost vytvářet velké modely s dobrými fyzikálními vlastnostmi, díky kterým lze výtisky nadále obrábět, nebo je používat jako formy pro vstřikování plastů. Ovšem je to technologie drahá, jak na pořizovací náklady tiskárny, tak na materiál pro tisk. Rychlost tisku se pohybuje okolo 2 l/h. Technologie SLA dosahuje největších přesností. Přesnost tisku této technologie běžně dosahuje $10 \div 100$ μm jsou však v dnešní době tiskárny dosahující přesnosti na 0,1 μm [6].



Obr. 3 – Stereolitografie [2]

Charakteristiky / omezení [2]

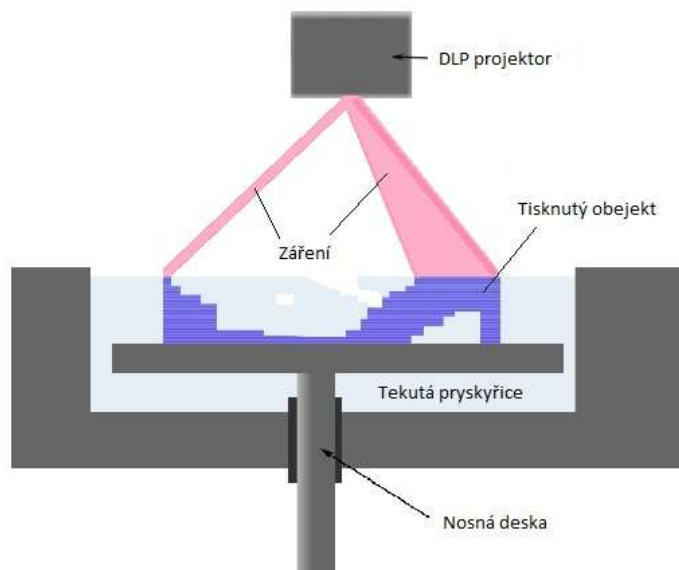
- Maximální výrobní prostor $2100 \times 700 \times 800$ mm
- Rozlišení 0.1 mm
- Typická tolerance $\pm 0,15$ mm (i vyšší za jistých povýrobních úrav)
- Minimální tloušťka vrstvy 0,016 mm

Praktické využití [2]

- Prototypy – vysoká teplotní odolnost, dobrý detail a povrchová úprava
- Odlévací formy

3.1.3 Digital Light Processing

Technologie DLP, česky digitální zpracování světla je velmi podobná Stereolitografii. Hlavním rozdílem je zdroj světla. Místo bodového laseru je zde použit DLP projektor, podle něhož se ujal název této technologie, který stejně jako u SLA slouží k vytvrzení tekutého fotonpolymeru. Tiskárna promítá řez modelu pro aktuální vrstvu. Vrstva je tak oproti SLA tvrzena v jeden okamžik celá najednou. Po vytvrzení se nosná deska posouvá o hodnotu jedné vrstvy dolů, model je zaplaven okolní pryskyřicí a nastává osvit další vrstvy. Po té, co je osvětlena poslední vrstva, neznamená to konec tisku. Jsou vyžadovány další dokončovací operace, jako odebrání podpůrného materiálu, chemická lázeň a dodatečné vytvrzení pod UV zářením. Technologií se dá dosáhnout přesnosti pod 30 μm , podobně jako u ostatních stereolitografických tiskáren. V porovnání s FDM, DLP tisk poskytuje vyšší rozlišení a hladší povrchy. Velkou výhodou oproti ostatním technologiím je nezávislost rychlosti tisku na velikosti a složitosti modelu [7].



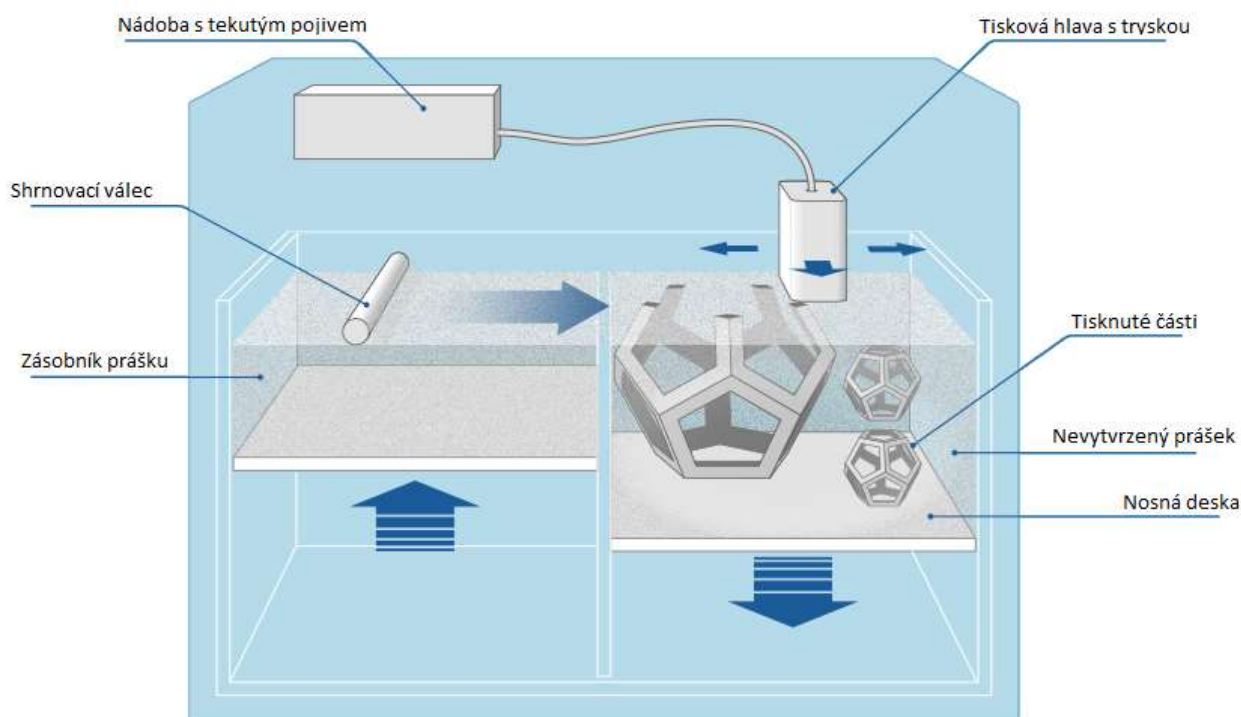
Obr. 4 - Digital Light Processing

Nejdůležitější komponentou projektoru je DLP chip, vyvinutý firmou Texas Instruments v roce 1987. DLP chip je velmi sofistikovaný světelný přepínač, skládá se z matice až 8,8 milionu otočných mikrozrcadel. Každé z těchto mikrozrcadel měří méně než jedna pětina tloušťky lidského vlasu. Zrcadla se naklánějí buď čelně k zdroji světla projekčního systému (ON) nebo od něj (OFF). Tak jsou vytvořeny na projekční ploše tmavé, nebo světlé pixely. DLP chip je ovládán digitálním signálem nesoucím obrazovou informaci a následně zrcadla v součinnosti s projekční optikou jsou schopny směřovat digitální obraz na jakýkoliv povrch o rozměrech od 60 palců do 100 stop. A pochopitelně v 3D tiskárnách i pod 60 palců. Rychlost tisku dnešních tiskáren s touto technologií se pohybuje okolo 2 l/h a protože rychlost nezávisí na složitosti a rozměrech objektu, lze rychlost vzádržet i v rychlosti osy Z a to až 50 mm/h [8].

3.1.4 Binder Jetting (BJ)

Technologie Binder Jetting, doslovně přeloženo tryskání pojiva, je další méně známou technologií 3D tisku. Funkčním principem je tryskání pojiva do čistého práškového materiálu. Tisková hlava se pohybuje v rovině XY a dávkuje pojivo do vyhlazené tenké vrstvy. Práškový materiál je shrnovacím válcem dopravován ze zásobníku do výrobního prostoru po velmi tenkých vrstvách. Následně je vrstva vytvrzena tiskovou hlavou, nosná deska se v ose Z posune o úroveň jedné vrstvy dolů, je nanесena další vrstva prášku a celý proces se opakuje. Po přidání barevných přísad do pojiv se dá docílit plnobarevného tisku. Metodou Binder Jetting se dá také docílit poměrně rychlého tisku. Pro komerční použití se využívá několika různých práškových materiálů – plastové a kovové prášky, keramické a slévárenské písky. V porovnání s ostatními nanášecími metodami, trysky u Binder Jetting vypadají podobně jako u inkoustové tiskárny a mohou tak nanášet několik kapek pojiva najednou. Z toho důvodu mohou být jednotlivé vrstvy zhotoveny mnohem rychleji než u ostatních metod používajících jednobodové nanášení pojiva. Technologie nevyžaduje uzavřený prostor a je energeticky nenáročná. Z těchto důvodů umožňuje velké výrobní

rozměry, běžně $800 \times 400 \times 400$ mm. Nevyžaduje žádný další podpůrný materiál, jelikož sám nevytvrzený prášek vlastně tvoří podporu a dokonce ho lze následně využít při dalším tisku, více v [5][6][2].



Obr. 5 - Binder Jetting [2]

Charakteristiky / omezení [2]

- Maximální výrobní prostor $4000 \times 2000 \times 1000$ mm
- Rozlišení 0.1 mm
- Typická tolerance $\pm 0,13$ mm
- Velká rychlost tisku
- Možnost plnobarevného tisku

Praktické využití [2]

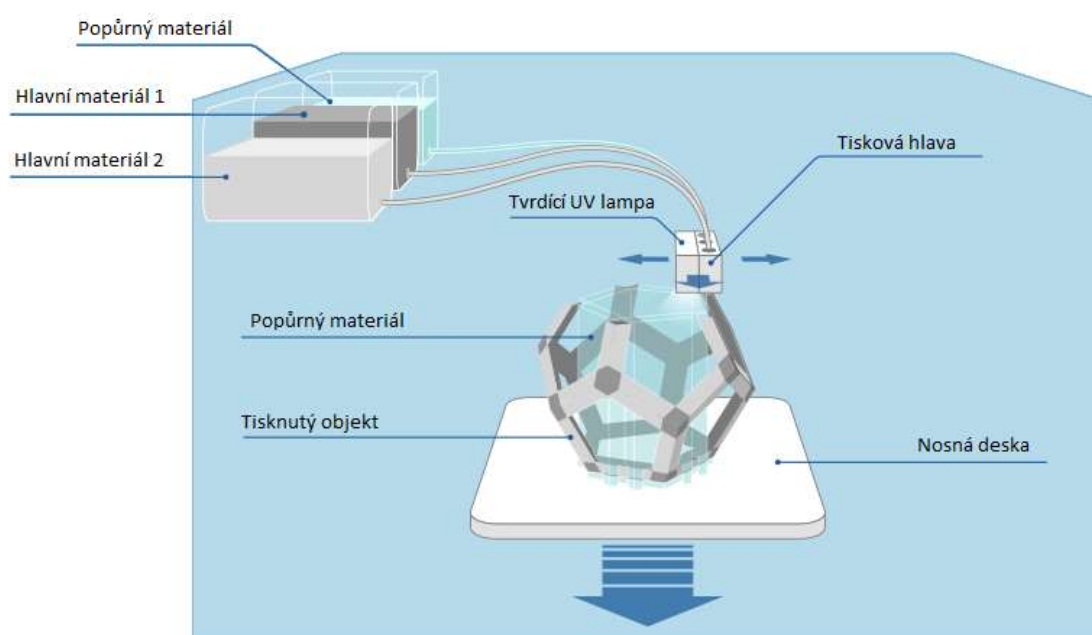
- Prototypy – produkovány v plnobarevně pro dobrý vizuální přednos
- „Zelené části“ – které jsou následně obráběny v dalších výrobních technikách
- Odlévací formy

3.1.5 Photopolymer Jetting (PJ)

Metoda Fotopolymer Jetting je založena na principu nanášení tekutého fotopolymeru tiskovou hlavou, podobně jako u inkoustové tiskárny, který je ihned simultánně vytvrzován UV zářením z

tiskové hlavy. 3D objekt je vytvářen tradičně vrstvu po vrstvě. Jednoduše lze docílit tisku více materiálů najednou, což umožňuje vícebarevný nebo více materiálový tisk. Pro tisk převyšujících struktur je vyžadován podpůrný materiál. Metoda vyniká dobrou přesností a výsledným povrchem výtisků. Nevýhoda této metody je, stejně jako u ostatních metod využívajících fotopolymer jako výrobní materiál, časová nestálost, omezené mechanické vlastnosti a cena fotopolymeru. Používá se k výrobě prototypů a forem pro odlévání [2].

Komerční název: PolyJET Matrix



Obr. 6 – Fotopolymer Jetting [2]

Charakteristiky / omezení [2]

- Maximální výrobní prostor $1000 \times 800 \times 500$ mm
- Rozlišení 0.15 mm
- Typická tolerance $\pm 0,025$ mm
- Minimální tloušťka vrstvy 16 μm
- Plnobarevný tisk

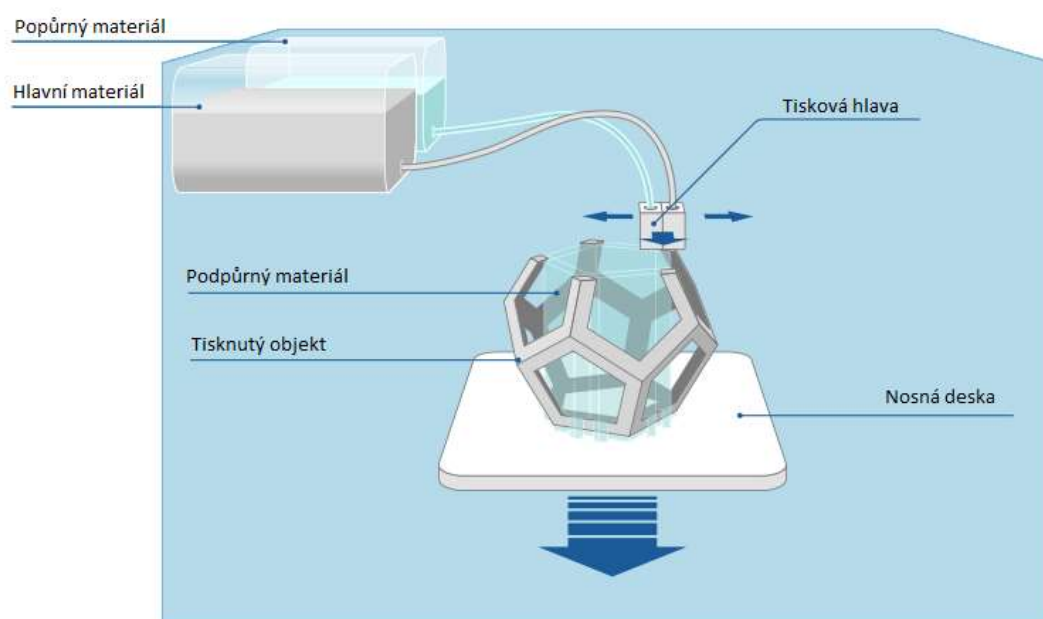
Praktické využití [2]

- Prototypy
- Odlévací formy

3.1.6 Material Jetting (MJ)

Material Jetting je metoda velmi podobná FDM. Tiskárny využívají vyhřívané trysky k nanášení roztaveného materiálu, nejčastěji vosku. Následně dochází k chladnutí a tvrdnutí materiálu podobně jako u FDM. Tisk je prováděn vrstvu po vrstvě, pro vyklenuté struktury je vyžadováno podpůrných materiálů. Dosahuje poměrně dobré přesnosti a výsledných povrchů. Naopak na výběr je pouze omezené množství vosků a tisk je poměrně pomalý. Nedá se ani hovořit o nějaké výsledné pevnosti a stálosti výtisku [2].

Komerční název: Multi Jet Modeling



Charakteristiky / omezení [2]

- Maximální výrobní prostor $300 \times 185 \times 200$ mm
- Rozlišení 0.1 mm
- Typická tolerance $\pm 0,025$ mm
- Minimální tloušťka vrstvy 13 μ m

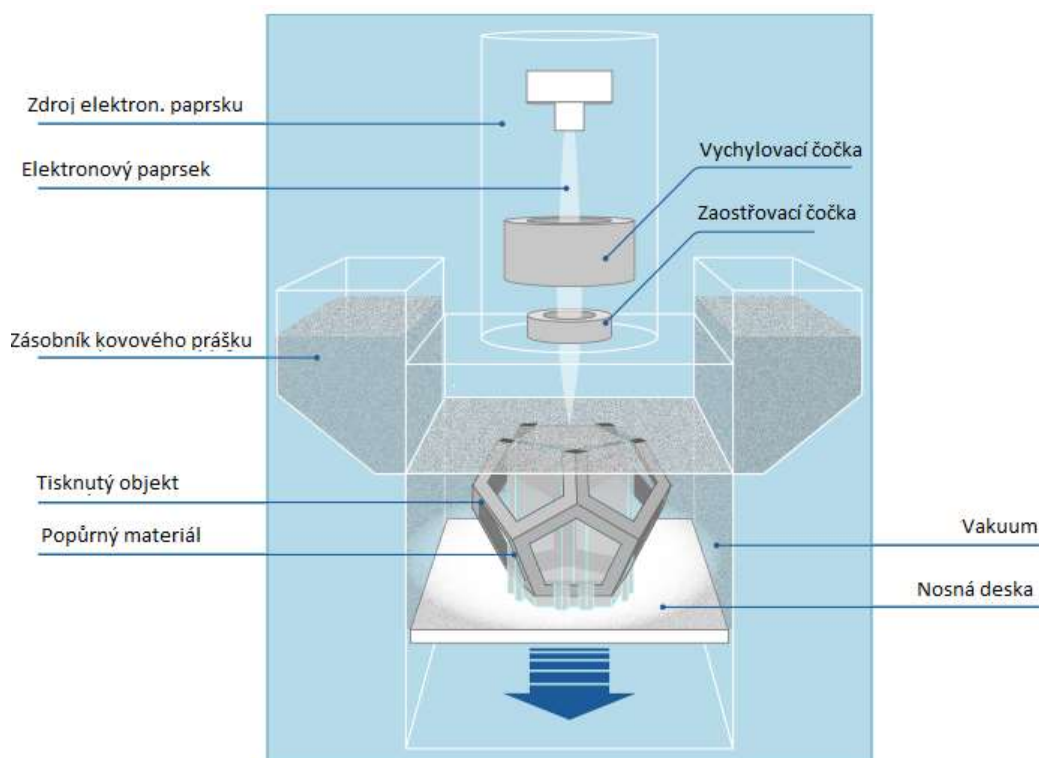
Praktické využití [2]

- Prototypy
- Odlévací formy – lékařství, dentální formy, šperkařství

3.1.7 Electron Beam Melting (EBM)

Electron Beam Melting je metoda velmi podobná Laser Sintering, přesněji řečeno Laser Melting. Využívá k tavení práškového materiálu namísto laserového elektronový paprsek. Zařízení nanáší kovový prášek na výrobní platformu a následně je taven elektronovým paprskem. Výrobní

platforma je pak snížena o jednu vrstvu a celý proces se opakuje. Pro tisk vyklenutých struktur metodou EBM je potřeba podpůrných materiálů, které zároveň odvádějí z výtisku teplo a tím zmenšují tepelné namáhání a předchází deformacím. Prostor pro tisk je vyplněn vakuem. Používají se standardní kovové materiály, a tak dosahuje velmi dobrých mechanických vlastností srovnatelných s konvenčními metodami Rapid Prototyping. Oproti Laser Melting, EBM vykazuje menší tepelné namáhání výtisku, takže potřebuje méně podpůrného materiálu a je rychlejší. Nedosahuje však tak kvalitních povrchů, vyžaduje další post-processing a je nákladná [2].



Obr. 7 - Electron Beam Melting [2]

Charakteristiky / omezení [2]

- Maximální výrobní prostor $350 \times 350 \times 380$ mm
- Rozlišení 0.1 mm
- Typická tolerance $\pm 0,2$ mm
- Minimální tloušťka vrstvy $50 \mu\text{m}$
- Výsledný povrch $20,3 - 25,4 \mu\text{m Ra}$

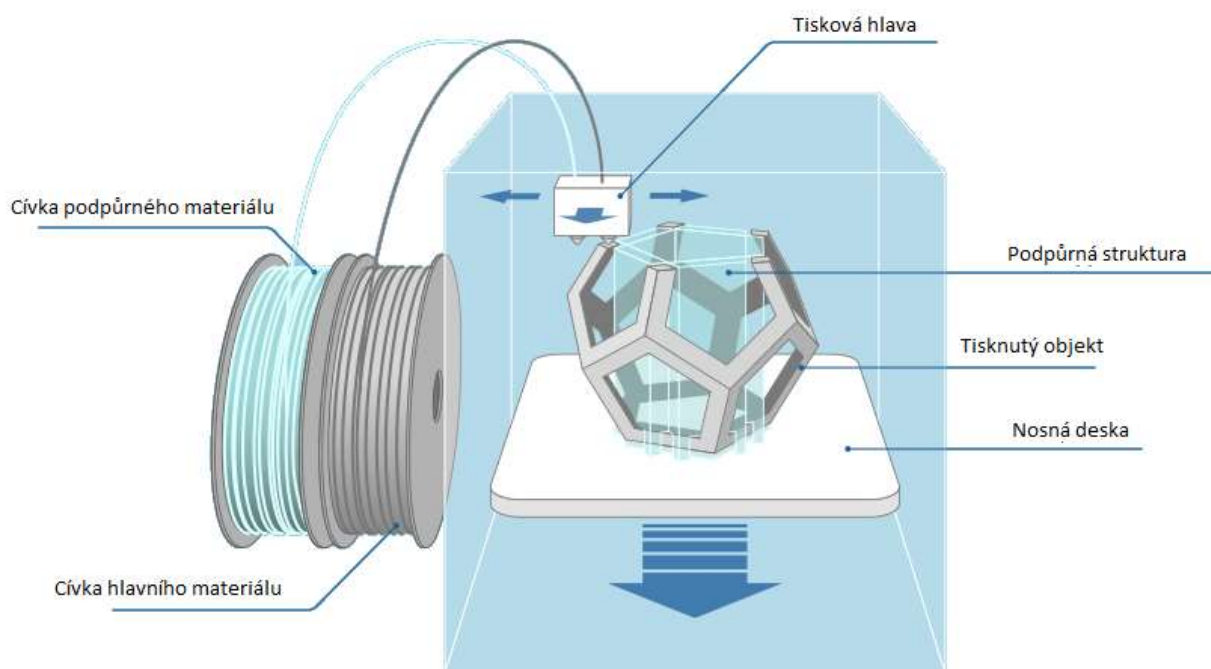
Praktické využití [2]

- Malá série výrobků
- Prototypy
- Podpůrné nástroje (fixtury)

4 FUSED DEPOSIT MODELING

Ve zkratce FDM, někdy označovaná také jako FFF, neboli Fused Filament Fabrication je nejvíce rozšířená technologie 3D tisku. Metoda včetně názvu FDM byla v roce 1989 patentována Scottem Crumpem a zároveň byla v tomto roce založena firma Stratasys, která se vývojem FDM technologie zabývala a zabývá dodnes [20].

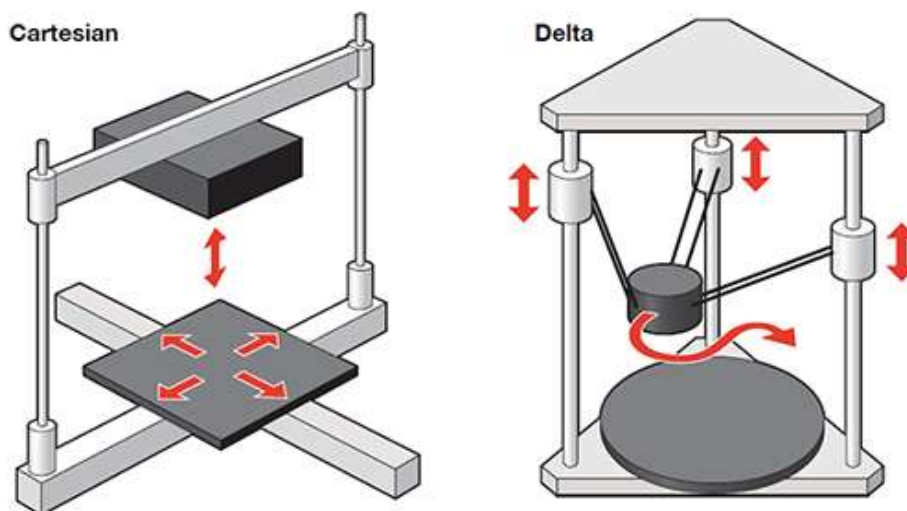
Největšího rozmachu se tato technologie dočkala v roce 2009, kdy skončil výše zmiňovaný patent. Začali vznikat projekty typu RepRap z nichž právě on měl na vzestup 3D tiskových technologií obecně největší vliv. Zkratka FFF se začala používat v rámci projektu RepRap a vlastně tak obcházela FDM patent. Patří také mezi technologicky nejjednodušší principy 3D tisku a je tak dostupná pro širokou veřejnost v podobě nejrůznějších stavebnic, kitů, nebo už hotových sestavených a odladěných tiskáren. Jako materiály pro tisk se používají termoplasty a bude o nich pojednáno v samostatné kapitole. Pro tisk složitých geometrií například vyklenutých povrchů je nutno tisknout podpory. Ty mohou být ze stejného materiálu a jsou po tisku mechanicky odděleny, nebo při více extruderovém provedení tiskové hlavy je možno podpory tisknout jiným materiálem, například vodě rozpustným PVA. Technologie FDM je založená na vlastnostech teplem tavitelných plastů - termoplastů. Materiál je ohříván na teplotu měknutí a tryskou je nanášen na nosnou vyhřívanou desku vrstvu po vrstvě, stejně jako u všech ostatních technologií 3D tisku.



Obr. 8 - Fused Deposit Modeling [2]

Používají se různé typy souřadných systémů, nejběžnější je Kartézský souřadný systém. Provedení pevný výrobek a tisková hlava (vřeteno) pohybující se v osách XYZ, jako u CNC obráběcích strojů, není běžné. Častěji se vyskytují konfigurace hlava v rovině XY, výrobek v ose Z, nebo naopak, výrobek v rovině XY a hlava v ose Z. Velmi často se také používá systém „delta“,

jehož hlavní výhodou je menší hmotnost pohyblivých částí. Méně používaným, avšak také možným a podporovaným systémem je polární systém „scara“, který například využívají průmysloví výrobní roboti.



Obr. 9 – kartézský souřadný systém a systém delta [9]

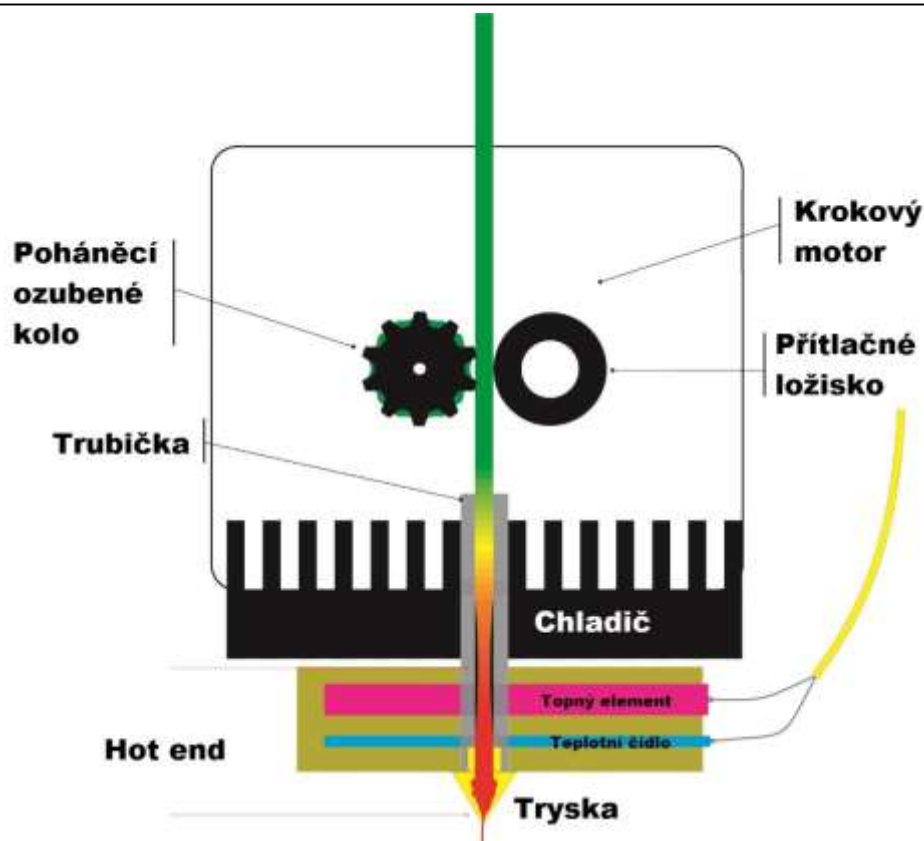
Velmi oblíbené jsou také kinematiky vyvinuté například v rámci projektů jako je RepRap pro FDM 3D tiskárny - *CoreXY*, *CoreXZ*, kinematika typu *Ultimaker* a jiné.

Pro pohon os se typicky používají v profesionálních tiskárnách třífázové synchronní motory s vektorovým polohovým řízením. U nízkonákladových se používají především kvůli nízké ceně a jednoduchosti v drtivé většině pohony s krokovými motory. Pro dávkování filamentu se používají nejčastěji krokové motory, existují i experimenty se stejnosměrnými motory.

Základními částmi FDM tiskárny jsou extrudér, určený k tavení a nanášení materiálu, pohonný a polohovací systém, vyhřívaná nosná deska, v ideálním případě vyhřívaný prostor pro tisk a pochopitelně řídicí a výkonová elektronika včetně senzorů a elektrických pohonů.

4.1 Tisková hlava

Tisková hlava, nebo také slangově extrudér, je v podstatě nejdůležitější komponentou FDM 3D tiskárny. Úkolem tiskové hlavy je tavit plastový filament, měnit jeho tvar podle velikosti a tvaru trysky a v tenkých vrstvách nanášet na tisknutý objekt. Extrudér se skládá ze dvou základních částí: studeného konce – *cold end* a z teplého konce – *hot end*. Jak z názvů plyne, hot end slouží k tavení materiálu, skládá se z vyměnitelné trysky, topného elementu a chladiče. Studený konec se skládá z krokového motoru, ozubeného kola a přítlačného mechanismu. Dalšími potřebnými částmi extrudéru jsou ventilátory. Jeden ventilátor z principiálních důvodů chladí filament vystupující z trysky, aby opět zchladl a ztuhl. Druhý ventilátor chladí studený konec extrudéru.



Obr. 10 - schéma extrudéru FDM 3D tiskárny [10]

Pro kvalitní tisk je velmi důležité přesně koordinovat průtok filamentu tryskou v souvislosti s pohybem hlavy vzhledem k právě nanášené vrstvě. Při konstantní rychlosti pohybu hlavy je vyžadován konstantní průtok filamentu. Při změně pohybu hlavy, zejména v ostrých změnách trajektorie je nutné měnit průtok filamentu s co největší dynamikou. Tento proces se nazývá „retrakce“ (*retraction*). Z toho vyplývají požadavky na velmi přesné a dynamické dávkování filamentu. K tomu se využívá krokový motor, který má dostatečně velkou přesnost řízení v otevřené smyčce a pro tuto aplikaci dostatečnou dynamiku, hmotnost dávkovaného filamentu není nějak zvlášť velká. Existují i extrudéry s pohonem se stejnosměrným motorem, které mají teoreticky větší dynamiku, ale toto řešení vyžaduje poměrně drahé polohové čidlo.

K ohřevu filamentu za účelem tavení se zpravidla používá odporového ohřevu, především u nízkonákladových tiskáren. Nevýhodou odporového ohřevu je malá účinnost a celý extrudér je ohříván a musí být následně chlazen ventilátorem. Další možností ohřívání je použití indukčního ohřevu. Dosahuje se tím větších účinností, jelikož teplo vniká pouze v místech, kde je potřeba, tj. v trysce z elektricky vodivého kovu. Další možnou metodou je tavení filamentu pomocí laserového paprsku.

Z hlediska umístění pohonu pro dávkování filamentu existují dvě možnosti. Jendou z možností je integrace pohonu do tiskové hlavy. Nevýhodou tohoto uspořádání je hmotnost krokového motoru zvětšující moment setrvačnosti, kterým musí pohony os pohybovat. Pohon lze umístit i mimo tiskovou hlavu s do hlavy je potom filament dopravován v bowdenu. Výhodě v menší hmotnosti hlavy konkuruje nevýhoda způsobená pružností filamentu v bowdenu a

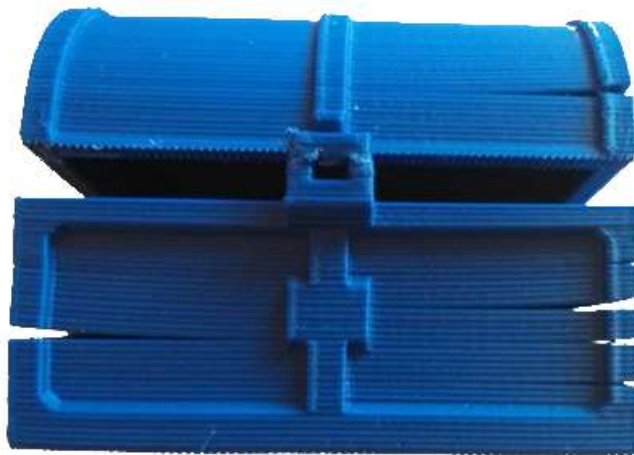
samotného bowdenu, díky které není možné zajistit tak přesné dávkování a retrakci materiálu do trysky a přináší tedy problémy s kalibrací tiskárny i s následným provozem a kvalitou tisku.



Obr. 11 – zvolený extrudér Bulldog a E3D V6 hot end

4.2 Vyhřívaná nosná deska

Heated bed je vyhřívaná základní nosná deska, na které přímo vrstvu po vrstvě vzniká výrobek. Nosná deska musí být vyhřívána hlavně při tisku z ABS materiálu. Jednak materiál na studenou desku špatně chytá a jednak je nutné celý výrobek během tisku aspoň do jisté míry temperovat, aby nedošlo k deformacím výrobku vlivem teplotní dilatace. K tomuto škodlivému efektu také přispívá, když je nová vrstva nanášena na předchozí vrstvu, která již moc zchladla. Nedojde tak ke kvalitnímu spojení vrstev a kvůli teplotní roztažnosti dochází ke smršťování chladnoucích vrstev a tedy k deformacím. Onen zmíněný škodlivý efekt je zobrazen na následujícím obrázku.



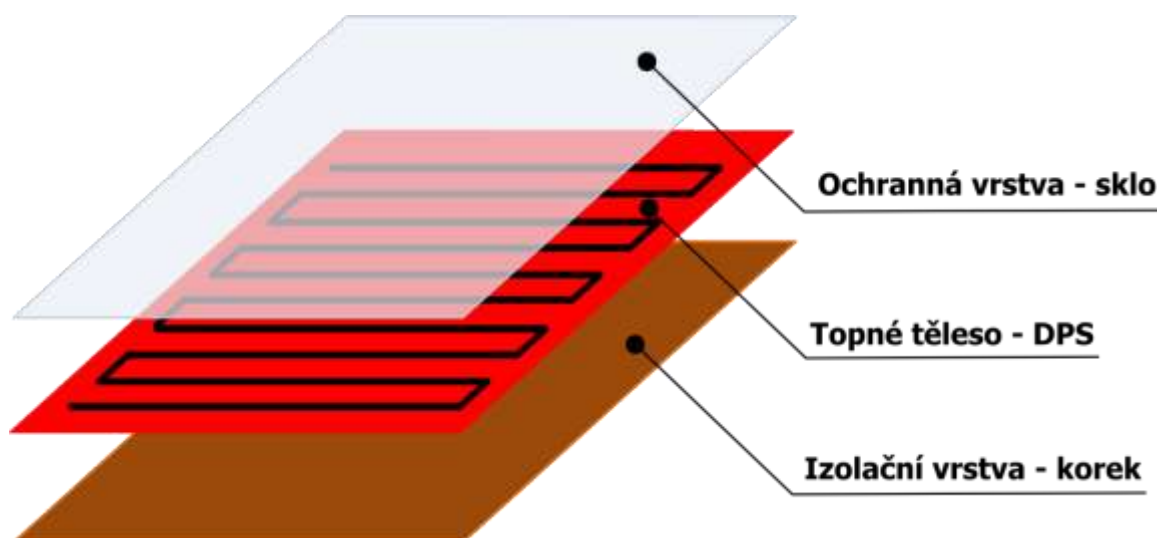
Obr. 12 – „cracking“ efekt ABS materiálu [10]

Výhradně pro tisk ABS materiálu je vyžadováno použití vyhřívané podložky. Podložka je vyhřívána na teplotu okolo 100°C po celou dobu tisku. Vyhřívané podložky se skládají ze tří vrstev.

Nejdůležitější vrstvou produkující teplo je prostřední vrstva. V podstatě se jedná o desku plošných spojů meandrovitě vyplněnou měděnými cestami. Výsledná teplota je udržována zpětnovazební regulací. Jako čidlo teploty se používá NTC rezistor v SMD pouzdře napájený přímo na desce. Podložky se napájí 12V nebo 24V a mají výkon okolo 100 ÷ 300W v závislosti na velikosti desky a potažmo odporu cest.

Pod topnou vrstvou se nachází izolační vrstva. Ta zamezuje přestupu tepla do jiných částí než do vrchní vrstvy a potažmo do výtisku a zkracuje tím dobu ohřevu před tiskem na potřebnou teplotu. Jako materiály se dají použít jakékoliv tepelné izolanty, například: korek, bavlna, silikon, teflon a jiné [10].

Vrchní vrstva zajišťuje ochrannou funkci a usnadňuje sundávání výtisku z podložky. Vyrábí se z materiálů, které mají pokud možno dobrou tepelnou vodivost a mají velmi hladký, vyleštěný povrch. Používané materiály jsou sklo, keramika a kov. Sklo má nevýhody v malé tepelné vodivosti a v případě, že není rovnoměrně ohříváno, je náchylné na praskání. Je však velmi levné a používá se nejčastěji. S povrchem podložky se dost experimentuje i vyhřívané sklo někdy není pro ABS materiál dostačující, proto se pro zvětšení adheze potahuje kapton páskou, amatérsky se dost často používá lak na vlasy, či jiné chemické sloučeniny [10].



Obr. 13 – vyhřívaná nosná deska

4.3 Vyhřívání prostor

Heated chamber, neboli vyhřívání pracovní prostor zajišťuje ještě lepší podmínky pro tisk ABS materiálu bez deformací. Prostor je vyhříván na konstantní teplotu od 70 °C až po 200 °C [21]. Technologie uzavřené vyhřívání komory je patentována firmou Stratasys až do roku 2020, proto není možno bez svolení tuto technologii používat pro komerční použití.

Protože je komora vyhřívána na teplotu, která se rovná skoro maximální provozní teplotě krokových motorů, je nezbytné umístit motory mimo komoru. Pro úsporu energie je výhodné výrobní prostor tepelně izolovat.

Vzduch v komoře je z pravidla zahříván odporovou topnou spirálou společně s ventilátorem zajišťujícím cirkulaci vzduchu. V případě velkého výkonu nosné desky a dobré izolace komory, nemusí být použití dalšího topného tělesa nutné. Některé tiskárny dokonce pracují jen s vyhřívanou komorou s pasivní nosnou deskou.

4.4 Materiály filamentu

Materiál pro tisk, slangově nazývaný filament, se prodává nejčastěji po kilových 400 metrových cívkách plastového drátu v průměrech 1,75 mm nebo 3 mm. Dnes je na trhu spousta materiálů různých barev a odstínů od nepřeberného množství výrobců. V následujícím textu jsou popsány nejpoužívanější materiály a jejich vlastnosti.



Obr. 14 - 1kg cívka filamentu

4.4.1 PLA – Polylactic Acid

Je nejpoužívanější materiál používaný pro FDM tisk vyráběný ze škrobu, je biologicky rozložitelný a životnímu prostředí nezávadný. Teplota tání je v rozmezí $180 \div 230$ °C. Výpary nezapáchají a nejsou zdraví nebezpečné. Dobře přilíná na nosnou desku při pokojové teplotě, striktně tedy nevyžaduje speciální vyhřívanou podložku, nýbrž pouze takzvanou modrou malířskou samolepící pásku, kterou je nutno čas od času vyměňovat. Objekty vytisknuté z PLA materiálu jsou robustní, ale poměrně křehké a nejsou tepelně odolné. PLA patří mezi levnější materiály, jeho cena se pohybuje okolo 30 \$ na 1 kg cívku a obvykle se prodává v cívkách o hmotnosti 0,5; 1 a 2,3 kg. Je dostupný jako přírodní průsvitný, nebo ve spoustě jasných a zářivých barvách. Existují také typy měkkého a ohebného PLA materiálu na menší teploty tisknutelné velmi malými rychlostmi, které se mohou využívat pro výrobu spojů, řemenů a pneumatik [1].

Základní vlastnosti [22]	
Teplota trysky	160-220 °C
Teplota nosné desky	striktně nevyžaduje, od teploty okolí po 60 °C
Doporučený povrch desky	„modrá malířská páska“
Charakteristiky	Biologicky odbouratelný, levný

Tabulka 1 – základní vlastnosti filamentu PLA

4.4.2 ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene

Druhým nejpoužívanějším materiálem je ABS vyráběný z ropy. Používá se ve spoustě průmyslových odvětvích, mezi snad nejvýznamnější zástupce patří stavebnice LEGO. Výpary jsou zápachající a považují se za zdraví nebezpečné, takže se důrazně doporučuje aktivní filtrace vzduchu při dlouhodobém tisku. Teplota tání je okolo $210 \div 260$ °C. Je dražší až stejně drahý jako PLA a je také velmi používaným materiálem. Výrobek je obvykle tisknut na vyhřívané podložce o teplotě okolo 100 °C, která je pokryta kapton páskou za účelem větší přilnavosti první vrstvy. Vyhřívaná podložka přináší složitost, větší náklady a spotřebu. Existují způsoby zvýšení přilnavosti prvních vrstev i na studenou podložku, důrazně se však její použití doporučuje, předchází se tak problémům s deformací velkých objektů. Výhody oproti PLA má ve větší pevnosti, menší křehkosti a ve větší tepelné odolnosti. Vyrábí se také podobně v mnoha barevných odstínech, včetně třpytivých barev, zlaté, stříbrné a dokonce barvy, které se mění s teplotou [1].

Základní vlastnosti [22]	
Teplota trysky	215-250 °C
Teplota nosné desky	90-103 °C
Doporučený povrch desky	Kapton páska, či jiný způsob zvýšení adheze
Charakteristiky	Biologicky neodbouratelný, materiál používaný ve stavebnicích LEGO

Tabulka 2 - základní vlastnosti filamentu ABS

4.4.3 Nylon

Materiál Nylon 618, který vyrábí snad jen firma Taulman, vyniká některými svými charakteristickými vlastnostmi, jako například ohebností, nízkou hmotností a chemickou odolností. Je extrudován při vyšších teplotách v porovnání s PLA nebo ABS a to při teplotě okolo 245 °C. Ohřev neprodukuje žádné pachy a výpary a snadno přilne i na obyčejnou modrou malířskou pásku. Výrobky jsou mechanicky odolné s malým povrchovým napětím a používají se například



v lékařství, jelikož je nylon chemicky neaktivní vůči lidskému organismu. Cena nylonu je dvojnásobná než ABS nebo PLA a vyrábí ho firma Taulman pouze v přírodní bílé barvě [1].

4.4.4 PVA – Polyvinyl Alcohol

Je ve vodě rozpustný materiál, který se primárně používá pro tisk podpůrných struktur pro složité PLA nebo ABS objekty, který je pak jednoduše odstraněn teplou vodou, což zanechává vynikající kvalitu povrchu podporovaného objektu. Teplota tání je 170 °C a nikdy nesmí překročit teplotu 200 °C. Materiál PVA je poměrně drahý, okolo 90 \$/kg [1].

Základní vlastnosti [22]	
Teplota trysky	180-200 °C
Teplota nosné desky	50 °C
Doporučený povrch desky	„modrá malířská páska“
Charakteristiky	Biologicky odbouratelný, rozpustný ve vodě, používaný pro podpory

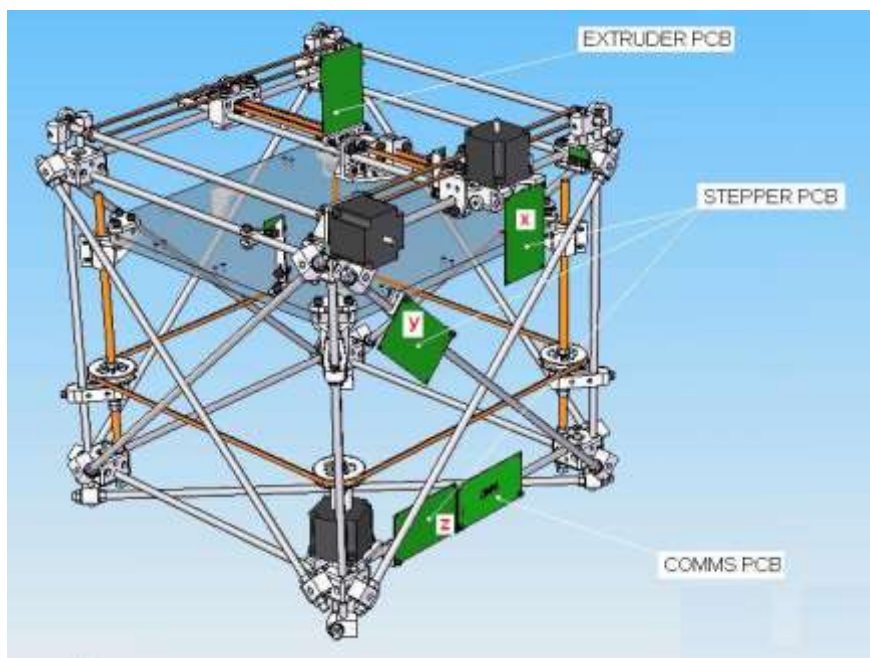
Tabulka 3 - základní vlastnosti materiálu PVA

4.4.5 HIPS – High-impact Polystyrene

HIPS je plastový materiál rozpustný v limonenu, někdy se používá pro podpůrné struktury, hlavně pro ABS. Lze snadno odstranit chemickou cestou. Limonen je přírodní rozpouštědlo extrahované z citrusové kůry. Teplota tání HIPSu je okolo 230 °C a cena se pohybuje okolo 40 \$/kg [1].

5 PROJEKT REPRAP

Projekt RepRap začal v letech 2004 - 2005, kdy Adrian Bowyer docent Univerzity v Bathu, dostal nápad postavit stroje reprodukcující sami sebe, stroje které budou schopny vyrobit většinu dílů potřebných k jejich sestavení. Úkolem projektu bylo najít technologie vhodné pro vytváření mechanických a konstrukčních částí, elektroniky a řízení. 3D tisk existoval již po mnoho let, avšak vyžadoval drahé, patentované a profesionální stroje používající tyto aditivní techniky pro vytváření trojrozměrných objektů. Myšlenka docenta Bowyera měla velký úspěch a na projektu začal pracovat z počátku jen na univerzitě v Bathu malý tým lidí. V letech mezi 2006 a 2008 byl zhotoven první prototyp 3D tiskárny, který byl schopen vytisknout díly na zhotovení sebe sama – RepRap Darwin [1].



Obr. 15 - RepRap stroj číslo jedna – RepRap Darwin [10]

Po Darwinovi následovaly další modely jako Mendel a Huxley. V roce 2010 se komunita RepRap poměrně rozrostla, projekt se začal vyvíjet nezávisle na zakládajícím teamu. Lidé si začali vyměňovat nápady a myšlenky přes internet. Projekt se rozvětvil do různých směrů týkajících se 3D tisku zvláště – mechanická konstrukce, elektronika, software, materiály tisku, komponenty tiskárny atd. Projekt již neměl pouze jeden směr, rozšířil se do celého světa a původním týmem již nebyly vytvořeny žádné nové modely [1].

Další velký milník nastal v roce 2011, kdy mladý český nadšenec Josef Průša zveřejnil svůj model Průša Mendel. Tvrdil, že je to Ford Model T 3D tiskárna, protože poskytoval velké zjednodušení konstrukčních dílů. Průša Mendel potřeboval díly běžně dostupné v kamenných obchodech a stal se tak nejoblíbenější tiskárnou světa [1].

Poté, co byla vyřešena mechanika a elektronika umožňující rychlý, precizní a poměrně levný tisk, dalším nevyhnutelným krokem byl vývoj kvalitního open source software pro ladění, řízení a



nastavování tiskárny. Logika fungování stroje, jako koordinace pohybů jednotlivých os, koordinace pohonu extrudérů, ventilátorů a topných těles spočívá v řídicím softwaru [1].

Řeč je o programu *Slic3r*, který byl vytvořen v roce 2011, za účelem náhrady stávajícího nepříliš vhodného software pro další vývoj projektu RepRap. Po optimalizaci hardwaru tiskáren, byla rychlost tisku limitována softwarem. Odstranit toto omezení byl hlavní úkol Sliceru. Podmínkou pro rychlý vývoj a testování, je rychlý samotný tisk a příprava tisku. Slicer také umožňoval snadnější nastavování parametrů tisku, různé možnosti nastavování výplně, více extrudérový tisk a obecně uživatelsky příjemné prostředí [1].

5.1.1 RepRap 3D tiskárny

Tiskárny typu RepRap jsou založené na technologii FDM. Výrobní prostor mají obvykle okolo 8 l, přestože není obtížné tisknout i větší objekty. Jsou s tím však spojeny obtížnosti s deformacemi výrobků kvůli teplotní dilataci, především u materiálu ABS a s dobou tisku, kdy tisk velkých objektů může trvat i několik dní a každá drobná chyba ztrátou kroku počínaje a prokluzem filamentu konče může způsobit znehodnocení celého dlouhodobého tisku. Stejně tak díky většině mechanických dílů vytisknutých z plastu výsledná konstrukce nedosahuje náležité tuhosti ani pevnosti, tudíž není možné konstruovat velké výrobní prostory a dosahovat rychlého tisku.

Tiskárny RepRap pracují v Kartézském souřadném systému s nosnou deskou fixní, nebo pohybující se v jedné ose, nejčastěji ve dvou nebo i ve třech osách. Některé tiskárny jsou založeny i na systému *delta*, nebo *scara*. Velice rozmanitá je také nabídka řídicí elektroniky od originálních Arduino řešení s procesory Atmel, přes spoustu konkurenčních platforem jako Teensy3 založené na procesorech Freescale a jiné, až po embedded řídicí desky navržené přímo pro potřeby 3D tiskáren, často založené na procesoru Atmega 2560, známého z Arduino Mega. Hlavní rozdíly řídicí elektroniky bývají v ceně, kvalitě návrhu a použitých elektrických komponent, jednoduchosti výroby, podpoře doplňkových funkcí jako LCD displej, tisk z SD karty, podpora flash disku, podpora více extrudérů, modularita a další. Spousta těchto řídicích systémů je dostupná jako open source.

Stejně tak, jako existuje spousta open source hardwarových řešení řídicích systémů na nejrůznějších platformách, existuje také spousta open source softwarů kompatibilních s vybranými hardwary. O této problematice je pojednáno v kapitole 8.1 *Řízení nízkonákladových 3D tiskáren*.



6 PRŮZKUM TRHU KOMERČNÍCH 3D TISKÁREN S TECHNOLOGIÍ FDM

Na trhu je dnes k dostání veliké množství jak profesionálních tak i osobních 3D tiskáren od různých výrobců. Jsou na poli hráči, kteří stáli u zrodu této technologie, jako například americká společnost Stratasys. Velká spousta nejrozličnějších kopií a klonů tiskáren, stavebnic i samotných konstrukčních dílů se dá také koupit z Číny. Další možností, jak si opatřit svoji 3D tiskárnu, je vlastní konstrukce s použitím volně dostupných řešení, návodů a postupů.

Tiskárny se podle složitosti instalování a seřizování dají rozdělit do následujících skupin, viz [1]:

1. **„Hacker-style“ 3D tiskárny** – „do-it-yourself“ neboli udělej si sám, open-source hardware, open-source software, plně modifikovatelné a konfigurovatelné.
 - **RepRap** – modely: *Darwin*, *Mendel*, *Prusa Mendel*, *Wallance*, *Huxley*
Spousta firem tyto modely upravila a komercializovala pod vlastními značkami a názvy.
 - **Ultimaker** – známá, velmi dobrá a přesná tiskárna z Holandska.
 - **Printbot** – osobní tiskárny ze spojených států.
2. **„Hassle-free“ 3D tiskárny** – jsou dobrým kompromisem, prodávají se již zhotovené a zprovozněné, ale jsou stále částečně konfigurovatelné.
 - **Makerbot** – světově známá společnost, která velmi pomohla k rozšíření nízkonákladového 3D tisku. Modely: *Replicator*, *Replicator 2*, *Replicator ZX*.
 - **Solidole**
 - **Afinia Up!** – modely Plus a Mini, se kterými si i naprostý začátečník může pořídit tiskárnu s jistými možnostmi ladění a optimalizace.
3. **Plug and play 3D tiskárny** – uzavřené „černé skřínky“, velmi jednoduché používání, avšak velmi omezené nastavování a ladění, obdoba kancelářských 2D tiskáren.
 - **Cube** – první známější plně plug’n’play nízkonákladová 3D tiskárna, filament v kazetách, tří barevný tisk, wifi, USB, vlastní „easy to use“ software.

6.1 Vybrané komerční nízkonákladové 3D tiskárny s technologií FDM na trhu



Ultimaker	
Ultimaker 2 extended	
Výrobní prostor	223 × 223 × 305 mm
Rozlišení vrstvy	0,04 - 0,2 mm
Rychlost tisku	30 - 300 mm/s
Průměr trysky	0,25; 0,4; 0,6; 0,8 mm
Materiály	PLA, ABS, CPE
Uzavřená komora	ano
Počet extrudérů	
Cena	86 000 Kč

Obr. 16 – tiskárna Ultimaker 2 Extended



Makerbot	
Makerbot Replicator Z18	
Výrobní prostor	305 × 305 × 457 mm
Rozlišení vrstvy	0,1 mm
Rychlost tisku	
Průměr trysky	0,4 mm
Materiály	PLA
Uzavřená komora	ano, vyhřívaná
Počet extrudérů	1
Cena	200 000 Kč

Obr. 17 - tiskárna Makerbot Replicator Z18



Code-P West	
Extreme 2000	
Výrobní prostor	690 × 690 × 1900 mm
Rozlišení vrstvy	0,05 - 0,3 mm
Rychlost tisku	10 - 120 mm/s
Průměr trysky	0,4; 0,8; 1,2 mm
Materiály	PLA, PVA, ASA, woodfill, bronzefill
Uzavřená komora	ano
Počet extrudérů	2
Cena	570 000 Kč

Obr. 18 - tiskárna Code-P West Extreme 2000



Leapfrog	
Creatr XL	
Výrobní prostor	630 × 486 × 930 mm
Rozlišení vrstvy	0,02 mm
Rychlost tisku	30 - 300 mm/s
Průměr trysky	0,35 mm
Materiály	ABS, PLA, PVA, Nylon, Brick, Hybrid transparent
Uzavřená komora	polouzavřená
Počet extrudérů	2
Cena	130 000 Kč

Obr. 19 - tiskárna Leapfrog Creatr XL



Big rep Big rep one v3	
Výrobní prostor	1100 × 1050 × 1000 mm
Rozlišení vrstvy	0,01 - 0,1 mm
Rychlost tisku	-
Průměr trysky	-
Materiály	PLA, PLA colored, PLA effects (e.g. woodfill, bronzefill, ceramicfill, biofill, carbonfill)
Uzavřená komora	ne
Počet extrudérů	2
Cena	980 000 Kč

Obr. 20 - tiskárna Big rep one v3



re:3D Inc.® Gigabot XL 3.0	
Výrobní prostor	600 × 760 × 540 mm
Rozlišení vrstvy	0,01 mm
Rychlost tisku	60 - 100 mm/sec
Průměr trysky	0,4 mm
Materiály	PLA, ABS, Nylon, B-PET, Taulman, Flex (any plastic below 350°C)
Uzavřená komora	ne
Počet extrudérů	2
Cena	350 000 Kč

Obr. 21 - tiskárna re:3D Gigabot XL 3.0



	Sicnova JCR1000
Výrobní prostor	1000x600x600 mm
Rozlišení vrstvy	0,05 mm
Rychlost tisku	100 cm ³ /h
Průměr trysky	-
Materiály	PLA, ABS, PVA, PP, PC, HIPS, nylon, hard rubber...
Uzavřená komora	ano, vyhřívaná s regulací
Počet extrudérů	2
Cena	590 000 Kč

Obr. 22 - tiskárna Sicnova JCR1000

6.2 Profesionální 3D tiskárny na trhu

Pouze pro porovnání v jakých číslech a s jakými parametry se vyskytují profesionální 3D tiskárny.



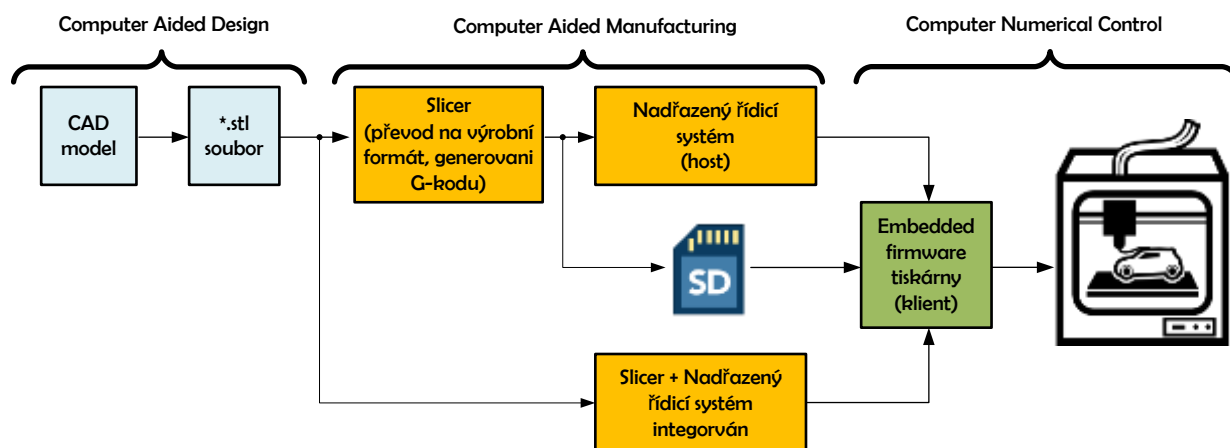
	EOS EOSINT P 800
Výrobní prostor	700×380×560 mm
Rozlišení vrstvy	0,12 mm
Rychlost tisku	7 mm/h (v ose Z)
Technologie	Selective Laser Sintering
Materiály	EOS PEEK HP3 (polyaryletherketon)
Uzavřená komora	Ano, dusíkatá inertní atmosféra
Další funkce	OLPC – online optická kontrola laseru při činnosti, příkon 12kW
Cena	1 000 000 \$

Obr. 23 - profesionální tiskárna EOS EOSINT P 800

7 PROCES 3D TISKU

Nezávisle na používané technologii 3D tisku (FDM, SLA...) je vstupním bodem pro výrobu reálných objektů trojrozměrný digitální model. Model bývá nejčastěji zhotoven podle potřeb designéra v některém z CAD programů. Takovýto model ještě nemusí být vyroben metodou 3D tisku, ale i jinou metodou Rapid Prototyping, třeba CNC obráběním apod. Druhým bodem je převod modelu ve standardním digitálním formátu na výrobní formát. Výrobní formát se pak již vztahuje přímo na konkrétní stroj, s konkrétní technologií výroby a konkrétním nastavením všech parametrů. Tento výrobní formát lze vyrobit již jen na konkrétním stroji. K jeho generování se používají CAM preprocesory. Třetím bodem je pak již samotný fyzický tisk. Všechny tyto jednotlivé body budou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách.

Návaznost těchto bodů graficky znázorňuje následující obrázek:



Obr. 24 - proces 3D tisku od digitálního modelu k fyzickému výrobku

Proces 3D tisku jako takový, od digitálního vzoru (modelu), po výsledný fyzický objekt je poměrně složitý a komplikovaný postup. Jako každá metoda Rapid Prototyping se dá rozdělit do tří základních kroků, přejato z [23]:

- **Pre-processing** – příprava výroby, CAM preprocesor rozdělí 3D objekt do horizontálních vrstev o tloušťce několika desetin až setin milimetru. Dále vypočítá trajektorii pohybu trysky, množství dávkování filamentu a případně dalšího podpůrného materiálu na základě nastavené výplně objektu (je totiž neekonomické a časově náročné tisknout 3D objekt se 100% výplně), definuje požadované teploty trysek, vyhřívané desky, koordinuje chod ventilátorů. Výstupem z CAM preprocesoru jsou instrukce pro embedded řídicí systém tiskárny, nejčastěji ve formě G-kódů.
- **Produkce (tisk)** – v závislosti na používané technologii 3D tisku, je ve výrobním prostoru charakteristickým způsobem sestavován po horizontálních vrstvách výsledný hmotný objekt.
- **Post-processing** – odstranění podpůrných struktur, finalizace povrchů, další obrábění.

7.1 Proces 3D tisku krok za krokem

Na následujících sedmi krocích je kompletně podrobně popsán postup kvalitního 3D tisku včetně nezbytné přípravy výroby, čerpáno z [1]:

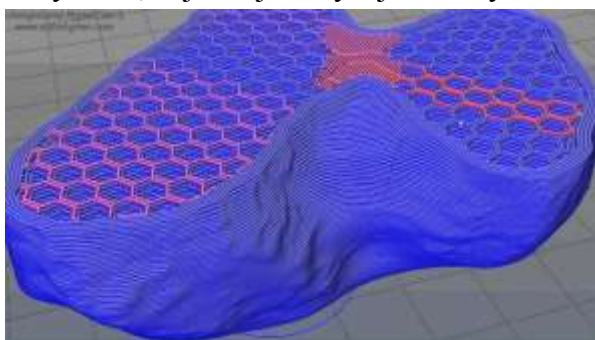
1. **Digitální model** - Prvním krokem je pochopitelně 3D digitální model – buď vlastní model vytvořený pomocí CAD softwaru (*Inventor, Solidworks, CINEMA 3D, Maya, 3DS Max, Rhino...*), nebo stažený z internetových databází (*Thingiverse, Grabcad...*).
2. **Export** – v druhém kroku je nutné model exportovat do standardizovaného formátu podle používaného CAM procesoru, nejčastěji se jedná o formát STL, STEP, STP.

3. **Oprava mesh sítě** – při modelování můžou v modelu vznikat poruchy, mikroskopické díry, mezery a jiné nesrovnalosti, které není možné fyzicky realizovat. K odstranění těchto nedostatků slouží software utilita pro opravu meshe – *netfabb Studio Basic, MeshLab*.



Obr. 25 – síť mesh 3D modelu

4. **Slicing** – „krájení“ – při této proceduře je 3D model s opravenou mesh sítí rozdělen v ose Z na jednotlivé horizontální vrstvy a je vypočítána výplň na základě požadovaných parametrů. Následně jsou vygenerovány instrukce, které je 3D tiskárna schopna vykonat, nejčastěji to bývají G-kódy. V tomto kroku se univerzální model „napasuje“ na konkrétní tiskárnu s konkrétními parametry.



Obr. 26 - slicing - model rozdělen do vrstev, hexagonální výplň

Některé slice programy: *Skeinforge, Slic3r, Cura, RepRapPro_Slicer, Kisslicer, E3D*

5. **Přenos dat** – před samotným tiskem je nutné vygenerovaný program G-kodů přenést do řídicí elektroniky tiskárny. Existuje několik možných způsobů. Jedním může být přenos pomocí externího média, nejčastěji SD karty, nebo flash disku. Druhým způsobem je v konfiguraci systému host a klient ve dvou

CAD

CAM

CNC



oddělených systémech, kde přenos G-kódů probíhá v reálném čase po sériové lince. Třetím způsobem je host a klient integrovaný do jednoho systému. Této problematice je věnovaná kapitola 8.1 *Řízení nízkonákladových 3D tiskáren*.

6. **Tisk** – konečně v tomto kroku již dochází k zhmotnění původního digitálního modelu jednou z výše zmiňovaných technologií 3D tisku.
7. **Finalizace** – krok, který není ve všech případech nezbytně nutný. Lze si pod ním představit odstraňování podpurných struktur, finalizace povrchů – broušení, leptání, další obrábění a jiné.

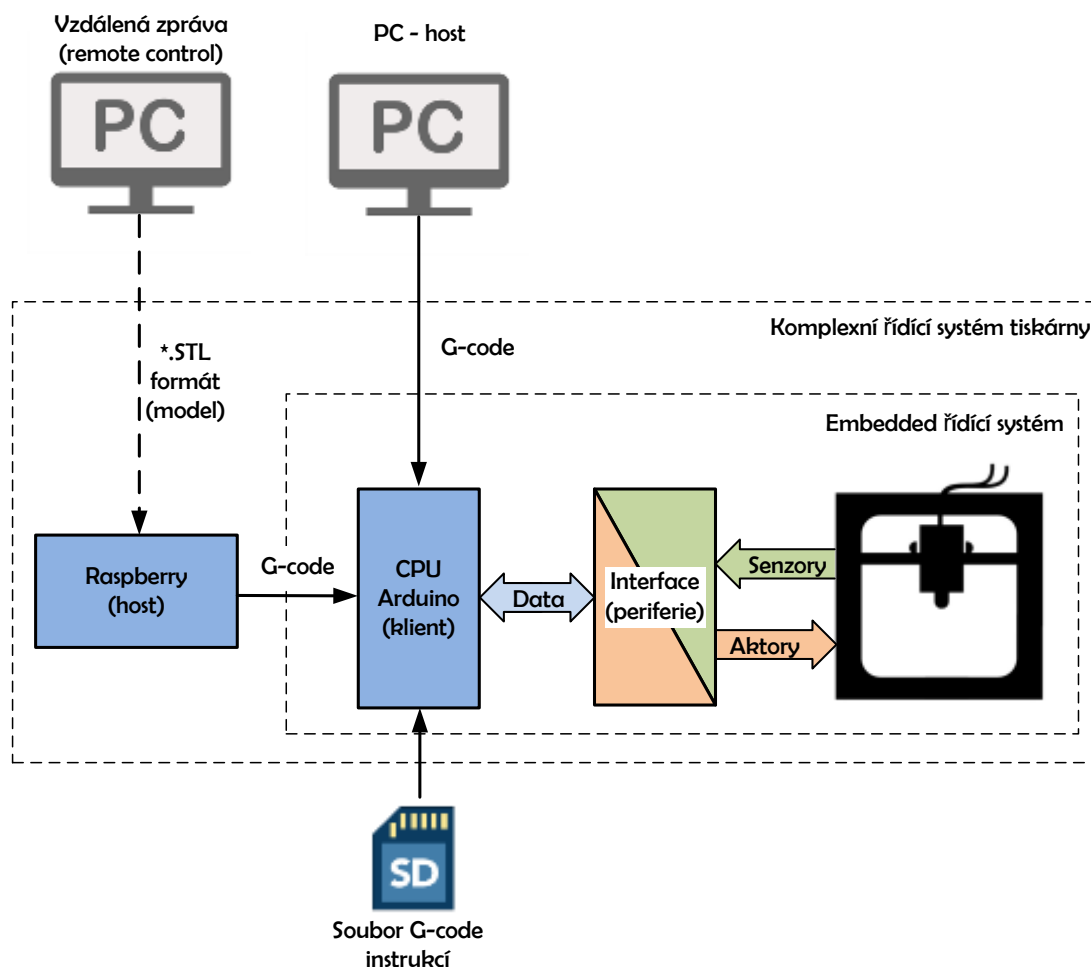
CNC

8 ŘÍZENÍ 3D TISKÁRNY

Jak již bylo řečeno, 3D tisk je aditivní metoda Rapid Prototyping. 3D tiskárny jsou v podstatě CNC stroje, lze tedy při pojednání o nich využít znalostí z oblasti konstrukce a řízení CNC strojů. Bude popsáno řízení 3D tiskárny konkrétně v případě nízkonákladových tiskáren a budou rozebrány jednotlivé části řídicího systému, od výpočetní části, pohonné soustavy a senzorů.

8.1 Řízení nízkonákladových 3D tiskáren

To co dělá nízkonákladovými 3D tiskárnami opravdu nízkonákladové jsou open source licence jak hardwarových řešení, tak především softwarových. Jak známo, v dnešní době obecně při vývoji jakéhokoliv produktu nejvíce času zabere vývoj SW a tedy znamená poměrně velkou část nákladů na vývoj produktu. U 3D tiskáren je tomu obzvlášť tak, jedna věc je funkční řídicí software, druhá věc je provést veškerá nastavení a kalibrace tiskárny. Až na některé výjimky, řekněme komerčních nízkonákladových 3D tiskáren, si uživatel veškerá nastavení provádí sám doma na svojí tiskárně. Při vývoji open source řídicích systémů 3D tiskáren je kladen velký důraz na využití existujících HW platform (Arduino, Raspberry PI a další jiné embedded platformy).



Obr. 27 - principiální blokové schéma řídicího systému nízkonákladových 3D tiskáren

8.1.1 Topologie řídicích systémů

a) Dvou systémová konfigurace host – klient

Nejvíce používanou konfigurací je dvou systémová konfigurace host-klient a to z důvodů nízké ceny klienta a možnost provozování hosta na osobním počítači. Pokud půjdeme postupně od mechanických částí tiskárny až po digitální model výrobku v PC, v bezprostředním kontaktu s pohony a senzory tiskárny je interface řídicího systému. Do interface vstupují signály ze senzorů a vystupují z něj výkonové signály pro napájení pohonů, topný těles a všech dalších aktorů tiskárny. Interface je pouze hardware bez složitější logiky, je vlastně jakýmsi rozšíření nebo nástavba řídicí platformy. Jako řídicí platforma se nejčastěji používá systém Arduino, konkrétně Arduino MEGA, které disponuje 8 bitovým procesorem. Většina řídicích softwarů byla vyvíjena a optimalizována právě na tento typ CPU. Arduino společně s interface představuje nezbytnou embedded část řídicího systému, která zajišťuje dekodování přijatých G-kódů, interpolaci, řízení pohonů os a extrudérů, regulaci teplot a všechny další „low-level“ operace. Tento *real-time* řídicí systém je jako klient připojen k nadřazenému řídicímu systému – hostovi. Host je „high-level“ řídicí systém, nejčastěji provozován na operačním systému Linux. Na hostovi běží program, slangově nazývaný „G-code sender“, který posílá G-kód instrukci po instrukci klientovy. Host řídí klienta většinou bez zpětné vazby. Při rešerši nebyla nalezena žádná informace o existenci zpětné vazby.

b) Jedno systémová konfigurace

Alternativní konfigurací je jedno systémová konfigurace. Veškerý software a řídicí algoritmy, interpretér G-kódu, interpolace, řízení a regulace v reálném čase běží na jednom víceúčelovém operačním systému jako například Linux. Operační systém ovládá speciální interface, který dál pohání motory, napájí topná tělesa apod. Dva nejznámější zástupci pro řízení CNC fréz jsou EMC (*Enhanced Machine Controller* – dnešní nejvýznamnější představitelé jsou *Mach3* pro Windows, *LinuxCNC* a další) a *Redeem* [10]. EMC ovládá interface pomocí klasického, dnes již velmi zastaralého paralelního portu. Pro účely 3D tisku lze uvést například *Aligator board*, *Fastbot* a jiné.

8.2 Host

Host je „high-level“ část řídicího software 3D tiskárny. Kvůli spolehlivosti se pro chod tohoto softwaru nepoužívá operační systém Microsoft Windows, ale Linux. Úkolem hostu je jednoduše řečeno otevřít soubor vygenerovaný CAM preprocesorem a po sériové lince posílat G-kódy klientovi. Na hostovi můžeme pochopitelně provozovat i CAM software jako například *Slic3r*. V případě, že je host implementován přímo do výbavy tiskárny, stává se pak tiskárna naprosto autonomní stroj, do kterého je nahrán CAD model, převeden na G-kódy a vytisknut. Populární je provozovat host software na Raspberry PI, což je jednočipový počítač optimalizovaný pro operační systém založený na Linuxu a nestojí více jak 1500 Kč. Takovýto hardware je již velmi jednoduché připojit k internetu a využívat vzdálené zprávy tiskárny, sledování tisku přes web kameru, z chytrého telefonu apod. Host může být také realizován osobním počítačem. V dnešní době již není sériový port tradiční výbavou počítačů, klient je v tomto případě vybaven převodníkem z USB

na RS232 a komunikace probíhá přes USB. Mezi známý host software patří: *MatterControl*, *ReplicatorG*, *RepSnapper*, *RepRaptor*, *RepRap Host Software*, *send.py*, *reprap-utils*, *Pronterface*, *RebRep*, *Repetier-Host*, *X2sw*, *Simplify3D*, *3Delta* [10].

8.3 Klient

Klient tvoří embedded *real-time* „low-level“ část řídicího systému. Jeho úkolem je na základě přijatých G-kódů z hosta provádět jejich dekódování, interpolaci, řízení pohonů os a extrudérů, regulaci teploty hot endů, nosné desky a vyhřívané komory. Nejběžnější platformou pro realizaci klienta se v dnešní době využívá systém Arduino. Jedná se v současnosti o nejpopulárnější open source hardwarovou platformu, což ji předurčovalo pro tak velký projekt jako je RepRap.

Projekt Arduino se zrodil jako myšlenka týmu pěti inženýrů: Massimo Banzi a Gianluca Martino z Itálie, David Cuartielles ze Španělska a David Mellis a Tom Igoe z USA. Arduino bylo vyvinuto institucí IDII (Interactive Design Institute Ivrea) v severní Itálii na pomoc studentům pro řízení jejich studentských projektů [1].



Obr. 28 - Arduino MEGA

Projekt Arduino je kompletně pod open source licencí (CC) včetně výkresové dokumentace a programovacího software (GPL). Jediná věc, která není open source je ochranná známka [1].

Řídící deska Arduino MEGA, zobrazená na obrázku vlevo, se skládá z 8-bitového mikrokontroléru AVR od firmy Atmel společně s doplňkovými komponentami, které umožňují programování, provoz a začlenění do ostatních elektrických obvodů. Velmi důležitou vlastností platformy Arduino je kompatibilita CPU desek s obrovskou škálou rozšiřujících modulů tzv. „*shieldů*“ (~interfaců). Některé moduly jsou ovládány CPU deskou přímo přes GPIO piny, jiné komunikují po sériových

sběrnicích, jako I²C, SPI, UART atd., což umožňuje být několika modulům paralelně připojeným k CPU desce. Většina CPU desek obsahuje 5 V stabilizátor napájecího napětí pro procesor, 16MHz krystal, USB>UART převodník pro připojení k PC nebo pro následnou sériovou komunikaci s procesorem a konektory pro připojení modulů. Každý mikrokontrolér obsahuje *bootloader*, který usnadňuje zapisování programu do paměti kontroléru. Tento způsob nevyžaduje žádné speciální programátory, stačí pouze obyčejný USB port osobního počítače [1].



8.3.1 Klient software

Software klientu se slangově nazývá „řídící firmware 3D tiskárny“ a je to real-time „low-level“ software, který běží nejčastěji na platformě Arduino. Software je psán v jazyce ANSI C. Na této úrovni se provádí nastavování většiny základních provozních parametrů tiskárny, od definice vstupních a výstupních pinů, volby souřadného systému, přes nastavení PID regulátorů, teplotních senzorů, maximálních rychlostí/zrychlení motorů až po přídavné funkce jako LCD displej, SD karta a další. V současnosti je opět mnoho open source dostupných firmwarů, které je možné bezplatně získat, podle návodů nakonfigurovat a použít ve své RepRap 3D tiskárně. Na jejich vývoji a optimalizaci pracují celé týmy po mnoho let. Mezi nejznámější open source firmwary patří: *Sprinter*, *Marlin*, *Teacup*, *Smoothie*, *Replicator* a jiné.

8.3.1.1 Marlin

Marlin je jeden z nejznámějších a nejpropracovanějších open source RepRap Arduino firmwarů. Je založen na dvou starších firmwarech Sprinter a Grbl. Tento řídící firmware bude použit pro řízení konstruované tiskárny.

Základní charakteristiky a vlastnosti [30]:

- Bohatý slovník G-kódů
- USB komunikace s hostem
- Přes 40 kompatibilních řídících hardware
- Podpora komunikačních prostředí s LCD displejem, podpora SD karty
- Více jak 20 jazyků včetně Japonštiny a Ruštiny
- Podpora souřadných systémů: Kartézský, Delta, Scara, Core XY, Core XZ
- Až čtyři extrudéry
- Podpora jak NTC termistorů, tak termočlánků
- Tepelná ochrana
- Využití EEPROM pro uložení nastavení
- Kompenzace nerovnosti nosné desky
 - Podle naskenované sítě uložené v EEPROM
 - Manuální nastavování pomocí ovladače
 - Auto bed leveling s využitím senzoru v Z ose umístěného na tiskové hlavě
- Nastavení retrakce na embedded úrovni
- Nastavení akcelerace pohonů a ryvu (*jerk*) pro lepší provedení rohů a povrchů
- Podpora pro senzor přítomnosti filamentu a šířky filamentu
- Look ahead – plánování rychlostí pohonů
- Velká frekvence PWM
- Na přerušení založená tepelná ochrana
- Na přerušení založené řízení pohonů s lineárním zrychlením

A mnohé další.

8.4 Interface

Interface je mezičlánek mezi CPU deskou a vlastním hardwarem tiskárny. Obsahuje drivery krokových motorů, výstupy pro spínání topných elementů, řízení ventilátorů, osvětlení výrobního prostoru a pro další funkce podle potřeby. Rovněž obvody pro zpracování informací ze senzorů a připojení ostatních periférií tiskárny jako LCD display, ovládací prvky a jiné.

8.4.1 Interface RAMPS

Nejznámějším interface pro RepRap tiskárny je RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield). Interface byl vytvořen přímo pro potřeby RepRap nízkonákladových tiskáren. Existuje podrobný návod na jeho výrobu, osazení a oživení. Jeho modulární design obsahuje piny pro připojení driverů krokových motorů, což na jednu stranu zajišťuje variabilitu použitých driverů, možnost upgradu a jednoduché výměny při zničení driveru apod. Na druhou stranu toto řešení přináší jistou nerobustnost tohoto provedení.

Tento interface má však také jisté nevýhody, například spínací tranzistory bez nulových diod a situované tak, že na ně není možné umístit chladič. Nešťastně vyřešené a nespolehlivé výstupní konektory, kterými jsou obvyčejné „pin headry“, nedostatek výstupů pro komplexnější tiskárny a mnoho dalších nedostatků. Mezi jeho výhody patří zejména jeho velikost, která je přibližně stejná, jako Arduino Mega, především také cena a jednoduchost výroby i pro neodborné uživatele.



Obr. 29 - RAMPS 1.4 bez stepper driver modulů [10]

Vlastnosti interface RAMPS 1.4 [10]:

- Napájecí napětí 12V (za jistých opatření 24 V)
- 3 MOSFET výstupy pro vyhřívání nebo větrák
- 3 analogové vstupy pro termistor
- 11A pojistka pro vyhřívání nosné desky, 5A pojistka pro ostatní komponenty
- Max 5 modulů Pololu driverů pro krokové motory
- I²C a SPI piny vyvedené pro případná rozšíření
- Možnost připojení rozšíření na SD kartu
- LED indikace vyhřívání

Nedostatky

Tranzistorové výstupy jsou bez nulové diody a jsou buzeny přímo z výstupního pinu procesoru. Osazené tranzistory STB55NF06L mají jmenovitý kolektorový proud 55 A a závěrné napětí 60 V, což už se jedná o poměrně výkonový tranzistor. Tranzistory se nadměrně zahřívají, protože jsou pochopitelně nedostatečně buzeny a jsou tak v nich velké ztráty.

Důkaz výpočtem nabití kapacity hradla 1700 pF na 5 V výstupní proudem pinu procesoru 40 mA:

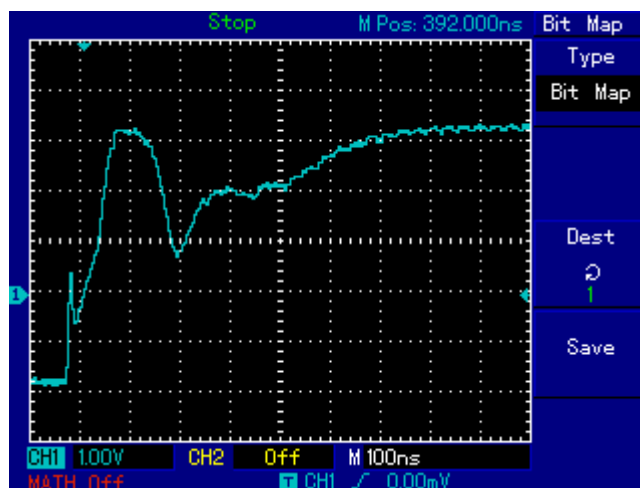
$$i = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (8.1)$$

$$s = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{I}{C} = \frac{0,04}{1,7 \cdot 10^{-9}} = 23,52 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1} \quad (8.2)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta U}{s} = \frac{5}{23,52} = 0,212 \mu\text{s} \quad (8.3)$$

Kapacita hradla 1700 pF je nabíjena maximálním proudem pinu procesoru 40 mA (teoreticky) prakticky však mnohem méně. Při těchto parametrech by bylo hradlo nabito na 5 V za dobu teoreticky 0,2 μs .

Důkaz měřením:



Obr. 30 - napětí U_{GS} při sepnutí tranzistoru na interface RAMPS

Z oscilografického záznamu je patrné, že doba sepnutí tranzistoru je nejméně 700 ns, navíc je zapínací děj doprovázen poměrně chaotickým průběhem napětí U_{GS} . Elektroda *gate* je z počátku nabita na 5 V, potom vybita na přibližně 2,5 V a poté opět nabita na plných 5 V. Pro porovnání je v závěrečné kapitole provedeno měření se správným způsobem buzení výkonového MOSFET tranzistoru s použitím příslušného integrovaného budiče, viz Obr. 68 – záznam průběhu napětí U_{GS} při spínání tranzistoru.

9 POHONY CNC STROJŮ

Prakticky lze v dnešní době použít pro pohon posuvných lineárních soustav CNC strojů dva typy synchronních elektrických motorů. Jedním z nich je harmonický synchronní trojfázový motor s permanentními magnety na rotoru a druhým je krokový motor s hybridní konstrukcí. Teoreticky se nabízejí i další typy elektrických strojů například bezkartáčový stejnosměrný motor BLDC (*Brush-less DC motor*), někdy také označovaný jako EC motor (elektronicky komutovaný motor). BLDC motor lze řídit o poznání jednodušeji než harmonický stroj, má výborné regulační vlastnosti a prakticky se řídí stejně jako kartáčový stejnosměrný motor. Nehodí se však pro pohon lineární osy CNC stroje s přesnou polohovou regulací. Tento pohon totiž neumožňuje jednoznačné držení polohy přesně v okamžiku komutace fázových proudů v cívkách. Ze stejného a dalších důvodů se zde nehodí použití stejnosměrných kartáčových motorů a to nejen z důvodů komutace, ale také kvůli spolehlivosti komutátorů. Nemít tyto nevhodné vlastnosti by byl stejnosměrný pohon velmi vhodným kandidátem, má totiž výborné regulační vlastnosti a například motory s kotvou bez železa ze samonosného vinutí mají velmi dobrou dynamiku.

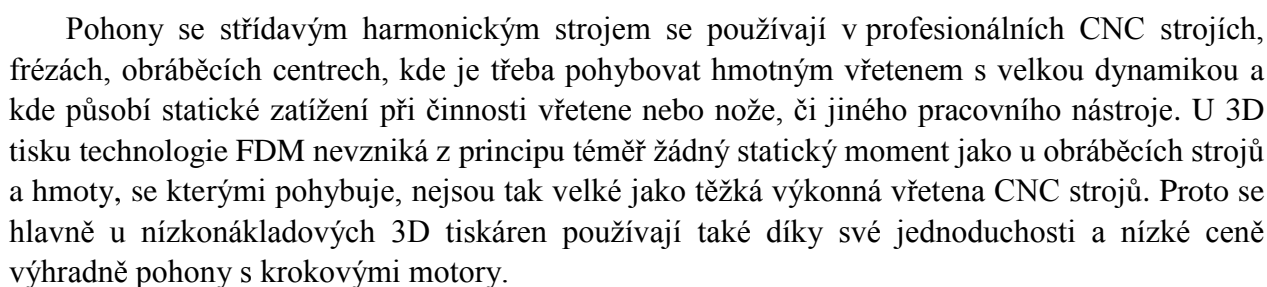
Porovnání klíčových parametrů pohonů [11]							
	M_{\max}	M_n	J	Velikost	Délka	Cena	Rychlost
AC synchronní	1,2	0,35	0,1	57	126	100%	8000
Krokový motor	0,65	0,45	0,1	57	79	80%	1500
BLDC*	0,75	0,31	0,17	57	82	80%	800

*Pozn.: zdroj neuvádí jednotky uvedených parametrů, považujeme je tedy za relativní pouze pro vzájemné porovnání.
* Nevhodný pro polohovou regulaci, vysvětleno výše.*

Tabulka 4 - porovnání parametrů jednotlivých typů pohonů

9.1 Pohon s AC synchronním strojem

Pohony lineárních posuvných soustav s harmonickým synchronním trojfázovým strojem jsou vždy realizovány motorem s permanentními magnety na rotoru napájeném tranzistorovým měničem. Jedná se vždy o řízení v uzavřené smyčce, což tedy bezpodmínečně vyžaduje použití polohového čidla. Výsledná přesnost regulace pak závisí především na parametrech čidla. Pro nepřímé odměřování polohy se používají rotační čidla polohy, jako například resolver, čidla sin-cos, nebo optické enkodéry absolutní i relativní a pro přímé odměřování se používají lineární polohová čidla inkrementální i absolutní. Pohon se vyznačuje velkou dynamikou oproti krokovým motorům, synchronní motory lze totiž řídit na konstantní maximální moment v širokém rozsahu otáček. Na druhou stranu, pohon se synchronním motorem je o poznání složitější a nákladnější. Na následujícím obrázku je znázorněna regulační struktura blokovým schématem.



9.2 Pohon s krokovým motorem

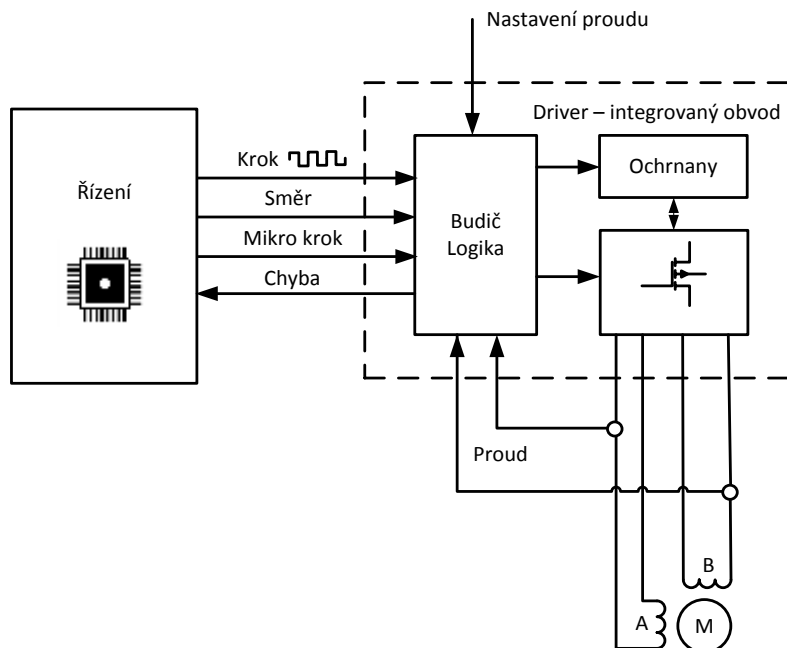
Pohon lineární osy s krokovým motorem je nejjednodušším způsobem poměrně kvalitního a přesného polohového řízení. V drtivé většině případů je skutečně řeč pouze o řízení v otevřené smyčce bez zpětné vazby, to je největší výhoda pohonů s krokovými motory, není při něm totiž potřeba nákladného polohového čidla. U krokových motorů je každý krok stejný, nejtypičtější je velikost jednoho kroku $1,8^\circ$, jsou však i menší $0,9^\circ$ a i větší. Ze znalosti převodového poměru z rotačního pohybu motoru na lineární pohyb osy lze vyjádřit velikost kroku v jednotkách lineární délky. Tak lze docílit přesné polohové regulace s rozlišením rovným velikosti jednoho kroku bez nutnosti snímání polohy, poloha je dána počtem kroků násobených velikostí jednoho kroku. Řízení v otevřené smyčce má však i svá úskalí. Pakliže dojde, především při dynamických mechanických dějích k překročení maximálního momentu motoru, dojde k výpadku ze synchronizmu tedy k takzvané ztrátě kroku.

To je situace, kdy skutečná poloha rotoru již neodpovídá vypočítané poloze a dochází tak k řízení s trvalou neodstranitelnou chybou a tedy v oblasti 3D tisku k znehodnocení tisku.

Nabízí se i možnost řízení v uzavřené smyčce. Nebývá to však pro pohony s krokovými motory typické, zvláště ne u 3D tiskáren, kde odpadá statické zatížení při činnosti stroje. Moment motorů je tedy dimenzován pouze na dynamický moment potřebný pro zrychlení setrvačných hmot. Aby nedocházelo ke ztrátám kroku, musí být dobře navržen potřebný moment motoru pro zvolené zrychlení a hmotnost zrychlované osy. Klíčem ke spolehlivé polohové regulaci s krokovým motorem v otevřené smyčce je důkladné dimenzování dynamického momentu motorů, případně následné omezení maximálního zrychlení v řídicím systému.

9.2.1 Integrovaný pohon krokového motoru

Na následujícím obrázku je nakresleno blokové schéma integrovaného pohonu s krokovým motorem s možností polohového řízení v otevřené smyčce. Vlastní pohon se skládá z motoru a integrovaného obvodu označovaném jako „*stepper driver*“. Největší výhodou těchto integrovaných pohonů je jednoduché použití a řízení, ale také fakt, že integrovaný obvod sám zajišťuje regulaci fázových proudů.



Obr. 32 - blokové schéma integrovaného pohonu s krokovým motorem

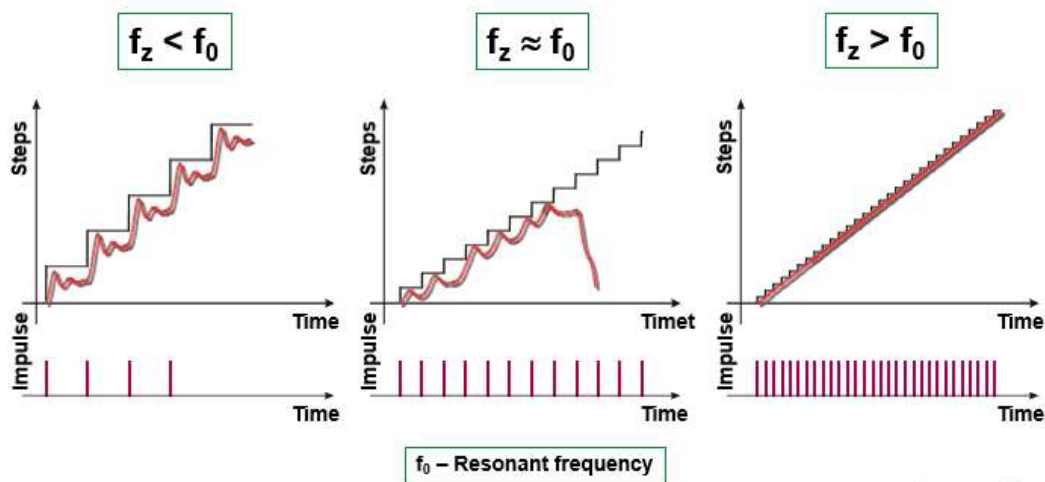
Obvod se skládá jak z výkonové části, tak z budiče, vstupní logiky a dalších ochranných a regulačních částí. K obvodu se připojují externí bočníky sloužící ke snímání fázových proudů. V drtivé většině těchto obvodů je výkonová část reprezentována dvěma plnými H-můstky, každý napájí jedno vinutí motoru. Všechny tyto drivery s typem řízení krok/směr mají dva nejdůležitější vstupní porty. Jedním je vstup krok, na který se přivádí z řídicího systému obdélníkový signál, jeden obdélníkový pulz znamená za určitých podmínek¹ jeden krok motoru. Frekvence obdélníkového signálu pak udává rychlost otáčení. Počet pulzů násobený velikostí jednoho kroku pak udává výslednou polohu rotoru. Druhý vstup směr slouží k definování směru otáčení ve směru hodinových ručiček CW (*clockwise*) a proti směru hodinových ručiček CCW (*counter-clockwise*). Dalšími vstupy jsou například nastavení krokování, nebo nastavování maximálního fázového proudu. Pomocí zpravidla jednoho výstupu informuje obvod nadřazené řídicí struktury o existenci havarijního stavu, například o překročení jmenovitého proudu, nebo teploty.

9.2.2 Vlastní rezonanční frekvence soustavy pohon – zátěž

Jednou z největších nectností pohonů s krokovými motory jsou motorem generované vibrace. Jak známo, krokový motor napájený pulzním proudem vytváří pulzní moment, což v důsledku zákona akce a reakce vyvolá mechanický třes celé mechanické soustavy na totožné frekvenci. Pokud se frekvence kroků bude rovnat vlastní rezonanční frekvenci soustavy, vlivem mechanické rezonance motor vypadne ze synchronizmu a dojde ke ztrátě kroku. Má-li se zařízení s pohonem s krokovým motorem vůči tomuto jevu vyvarovat, je nezbytné onu frekvenci zjistit a v řídicím software tuto frekvenci zakázat. Systém se pak chová tak, že při akceleraci a pohybu tuto frekvenci vynechává.

¹ Pokud je buzení nastavené na plný krok (1/1, 2-phase excitation, full-step)

Na následujících obrázcích jsou naznačeny tři situace, které mohou vzhledem k vlastní rezonanční frekvenci nastat:



Obr. 33 - vliv vlastní rezonanční frekvence soustavy na synchronizmus krokového motoru [11]

Na levém obrázku je stav, kdy frekvence otáčení f_z je menší než rezonanční frekvence f_0 . Nejen, že otáčení je značně neplynulé, navíc je doprovázeno rezonančními základy při každém jednotlivém kroku. Není příliš vhodné v této oblasti otáček pohon s krokovým motorem při polohovém řízení provozovat.

Na prostředním obrázku je naznačen stav mechanické rezonance. Frekvence momentových rázů se rovná frekvenci mechanické rezonance soustavy motor-zátěž a krokový motor vypadává ze synchronizmu, dojde k zastavení rotoru, přesněji k neuspořádanému chaotickému chvění rotoru.

Na obrázku vpravo je situace správně navrženého pohonu s krokovým motorem. Frekvence otáčení je větší než rezonanční frekvence a je natolik velká, že otáčivý pohyb je filtrován momentem setrvačnosti rotačních hmot a dá se téměř hovořit o rovnoměrném otáčivém pohybu.

9.2.3 Teorie krokových motorů

Krokový motor pracuje na zcela jiném principu než většina konvenčních točivých elektrických strojů. Zatímco většina z nich funguje na principu existence síly působící na elektrický náboj pohybující se v magnetickém poli (Lorentzovy síly), krokové motory pracují na reluktančním principu. Pokud cívkou na feromagnetickém jádře se vzduchovou mezerou teče proud, vyvolá tento proud elektromagnetickou sílu působící ve směru zmenšování vzduchové mezery. Magnetický obvod statoru a rotoru krokových motorů je tedy konstruován tak, že střídavým postupným spínáním cívek vždy jedna cívka má možnost zmenšovat svoji mezeru a tak se podílet na generování výsledného momentu. Moment na hřídeli motoru není v čase konstantní, protože závislost mezi silou a velikostí vzduchové mezery není konstantní ani lineární, ale hyperbolická. Se zmenšující se vzduchovou mezerou roste elektromagnetická síla. Frekvence zvlnění momentu

je dána počtem pulzů na otáčku a rychlostí otáčení. Částečnému vyhlazení momentu se dá docílit pomocí metodami mikrokrokování, nebo použitím vícefázového krokového motoru.

Krokový motor má oproti pohonu se synchronním harmonickým motorem nevýhodnou momentovou charakteristiku. Momentová charakteristika krokového motoru má od určité hodnoty otáček² hyperbolický tvar. Při vyšších otáčkách motor generuje několikrát menší moment, než moment statický. Tento fakt je nepříjemný zejména v situaci, kdy se osa pohybuje konstantní rychlostí a přijde požadavek na zpomalení. Motor může brzdit pouze tím momentem, který je při daných otáčkách schopen vyvinout, jinak dojde ke ztrátě kroku.

Základní parametry krokových motorů:

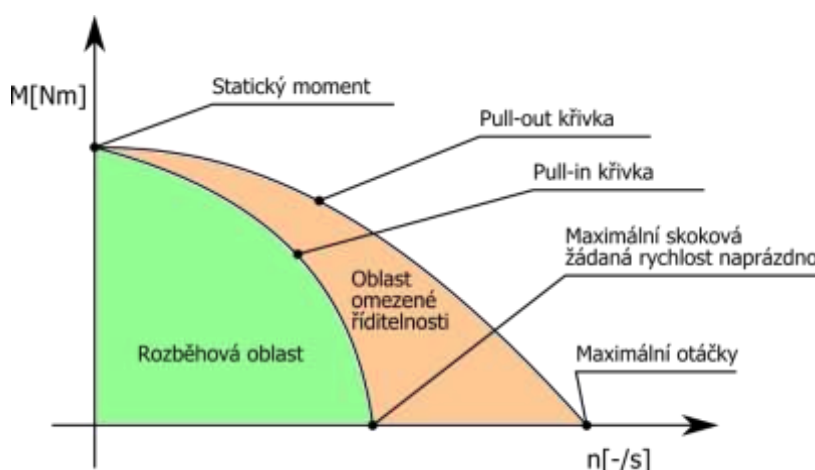
Typ vinutí: 2 fáze / 3 fáze / 5 fází, unipolární/bipolární/bifilární, s/bez vyvedeného středu fáze

Základní krok: u dvoufázových nejčastěji 1,8 °; ale také 0,9 °; výjimečně 0,45 ° i více jak 1,8 °

Moment: Statický moment při nabuzeném vinutí (*holding torque*) – moment, který motor generuje v ustáleném stavu elektrické i mechanické soustavy při jmenovitém fázovém proudu (vzduchová mezera má nejmenší možnou velikost).

Statický moment při nenabuzeném vinutí (*detent torque, cogging*) – moment vznikající interakcí permanentních magnetů rotoru s pólovými nástavci statoru. Tento moment existuje i bez přítomnosti fázových proudů.

Je definován jako moment, který může na motor působit při nenabuzeném vinutí, aniž by způsobil trvalé otáčení rotoru. Vyskytuje se pouze u krokových motorů obsahujících permanentní magnet [17].



Obr. 34 - dynamická momentová charakteristika bipolárního krokového 2f motoru

² Běžně již okolo 1000pps což odpovídá při 200 pulzech na otáčku 5s⁻¹, oproti synchronním strojům např. u pohonu s dvoupólovým strojem lze bez problému udržovat konstantní moment až do jmenovitých 50s⁻¹.



Rozběhová oblast – pro kterýkoliv pracovní bod pod pull-in křivkou se může motor skokově rozběhnout, zastavit nebo reverzovat bez ohrožení ztráty synchronizmu a tedy potažmo ztráty kroku [28].

Pull-in křivka – vyjadřuje maximální moment motoru při příslušné rychlosti, kdy je motor schopen skokového rozběhu, zastavení nebo reverzaci bez ohrožení vypadnutí ze synchronizmu. Za křivkou směrem k vyšším otáčkám a momentům se již motor nesmí skokem rozbíhat, brzdit nebo reverzovat [28].

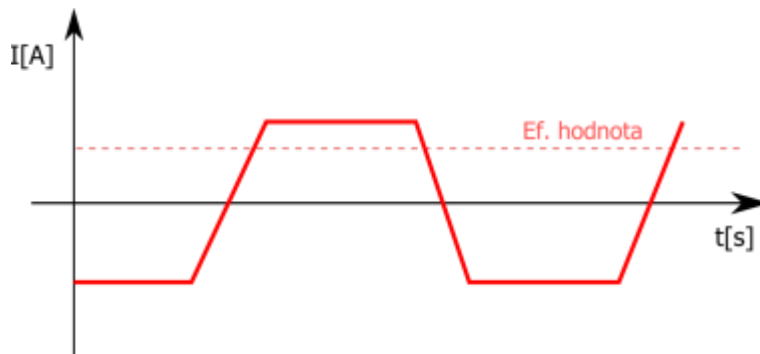
Oblast omezené řiditelnosti – v této oblasti již není možno skokově rozbíhat, brzdit ani reverzovat, žádanou hodnotu otáček je nutné nastavovat po rampě [28].

Pull-out křivka – vyjadřuje maximální hodnotu momentu, který je motor schopen vyvinout v synchronním režimu, při překročení této křivky se motor zastaví [28].

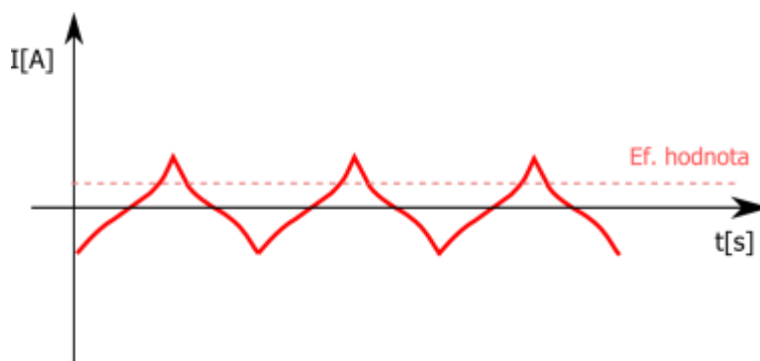
Moment setrvačnosti rotoru (*rotor inertia*): – veličina vyjadřující prostorové rozložení hmoty rotoru vzhledem k ose otáčení, rozhodující veličina společně s redukováným momentem setrvačnosti zátěže při navrhované dynamické složky momentu motoru.

Indukčnost vinutí: snižuje velikost momentu ve vyšších otáčkách, indukčnost omezuje strmost nárůstu proudu, jemuž je moment motoru úměrný. Proud vinutím narůstá exponenciálně s časovou konstantou $\tau = \frac{L_a}{R_a}$. Kde L_a je indukčnost vinutí a R_a je odpor vinutí. Za dobu jedné časové konstanty dosáhne hodnota proudu vinutím 63% ustálené hodnoty. 100% nedosáhne teoreticky nikdy, prakticky však za dobu 3τ . V důsledku tohoto jevu ve vysokých otáčkách proud „nestihne“ v průběhu velmi krátké periody pulzu dosáhnout maximální hodnoty a díky tomu dochází k poklesu efektivní hodnoty proudu, tedy potažmo i momentu.

Pro lepší pochopení jevu zmenšování efektivní hodnoty proudu a momentu slouží ilustrace z měření při různých frekvencích kroků:



Obr. 35 - fázový proud motoru při relativně malé frekvenci pulzů



Obr. 36 - fázový proud motoru při relativně velké frekvenci pulzů

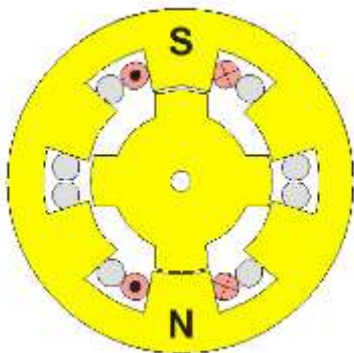
Odpor vinutí: odpor vinutí způsobuje ztrátový výkon $\Delta P = R \cdot I_{ef}^2$ a zahřívá ho, zhoršuje účinnost, omezuje ustálenou hodnotu fázového proudu.

Jmenovitý proud: proud, na který je tepelně dimenzováno vinutí motoru, při tomto proudu je motor schopen generovat jmenovitý statický moment. Prakticky to znamená, že na tento proud je nastaven driver krokového motoru, nutno však brát v potaz tepelné jevy.

Jmenovité napětí: tento parametr mnoho výrobců neuvádí, a když ano, jedná se o napětí vypočítané z jmenovitého proudu a odporu vinutí. Tímto napětím se však ve skutečnosti krokové motory téměř nikdy nenapájí, více o způsobech napájení v kapitole 9.2.3.2 *Napájení krokových motorů*.

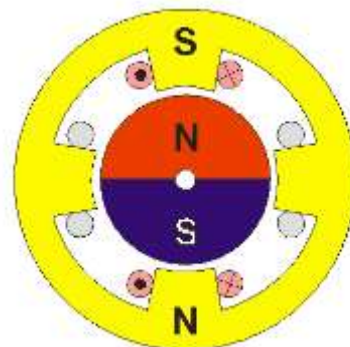
9.2.3.1 Typy krokových motorů

Krokové motory se z konstrukčního hlediska rozdělují na:



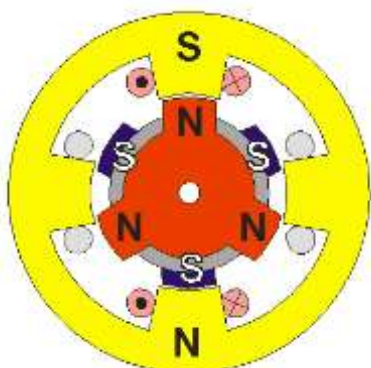
Obr. 37 - Variable reluctance [11]

VR – Variable reluctance, motory pracující čistě na reluktančním principu. Rotor i stator je ze železa, z čehož vyplývají nízké konstrukční náklady a vysoká odolnost. Principem jde o spínaný reluktanční motor. Má však několikanásobně víc pólových nastavců a tedy jemnější kroky. Výsledný moment nezávisí na směru proudu. Motor nevyvíjí tak velký moment v porovnání s ostatními typy krokových motorů a tak se vyrábějí takzvané vícepaketové motory.



Obr. 38 – krokový motor PM [11]

Krokové motory PM s permanentním magnetem na rotoru na rozdíl od VR motorů nemají rotorové zuby. Díky přítomnosti permanentního magnetu disponují větším momentem než VR, avšak absence pólových nastavců znamená velké kroky - 7,5°; 18° až 90°.



Obr. 39 - hybridní krokový motor [11]

Pro pohony CNC strojů se využívají **Hybridní krokové motory**, které jak už název napovídá, jsou kombinací obou přechodů. Rotor je tvořen permanentním magnetem s pólovými nastavci. Díky velkému počtu pólových nastavců je možné dosáhnout dobré jemnosti kroků. Nejčastěji se vyrábějí motory s velikostí jednoho kroku 1,8°, existují i 0,9° a 0,45°; na druhou stranu i 3,6°. Hybridní krokové motory vynikají velkým momentem a velkým počtem kroků na otáčku.

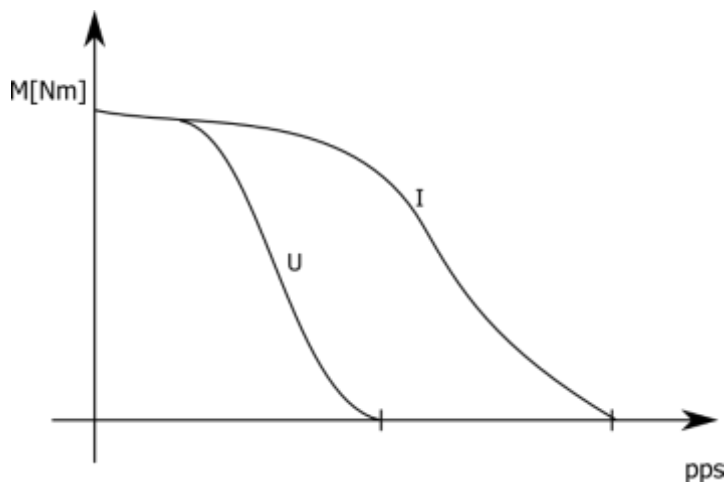
9.2.3.2 Napájení krokových motorů

Krokové motory se vyrábějí tradičně jako dvoufázové, trojfázové, vyskytují se i pěti fázové motory, jsou však už méně běžné. Dvoufázové krokové motory se používají pro méně náročné aplikace, jako jsou například 3D tiskárny. Více fázové motory mají výhody oproti dvoufázovým v hladším výsledném momentu, nižší hlučnosti, generují méně vibrací a tak jsou odolnější na vlastní rezonance soustavy a vykazují menší cogging. Pěti fázové motory se již v nových aplikacích nepoužívají a jsou nahrazovány třífázovými [11].

Způsoby napájení krokových motorů

- **Napět'ové napájení** – napájení ze zdroje konstantního napětí. V takovém případě musí být hodnota napájecího napětí rovna jmenovitému napětí motoru, aby v ustáleném stavu nebyla překročena hodnota jmenovitého proudu. Tento způsob z uvedených je nejméně vhodný, strmost nárůstu proudu v cívce je dána $\frac{di}{dt} = \frac{U}{L}$. Díky malému napájecímu napětí je strmost proudu malá a tudíž ve vysokých rychlostech dochází k poklesu momentu jevem vysvětleném v 9.2.3 *Teorie krokových motorů* – Indukčnost vinutí.
- **Proudové napájení** – jedná se v podstatě o napájení ze zdroje konstantního proudu. Nelze si však pod tímto pojmem představovat tradičně pojatý zdroj proudu. V tomto případě je tak docíleno zpětnovazební regulací fázového proudu, v dnešní době výhradně pomocí PWM modulace napájecího napětí tranzistorovým měničem s regulační strukturou. Napájecí napětí je až 8 krát [19] větší než jmenovité, teoreticky čím větší, tím větší dynamika, musí se však brát ohled na izolaci vinutí a proudová regulační smyčka musí být dostatečně rychlá. Laděním proudového regulátoru se dá docílit velmi dobré dynamiky nárůstu proudu i třeba za cenu překmitu. Díky těmto vlastnostem se pouze tento způsob využívá u moderních pohonů. Na stejném principu pracuje i většina integrovaných obvodů označovaných jako „stepper driver“.

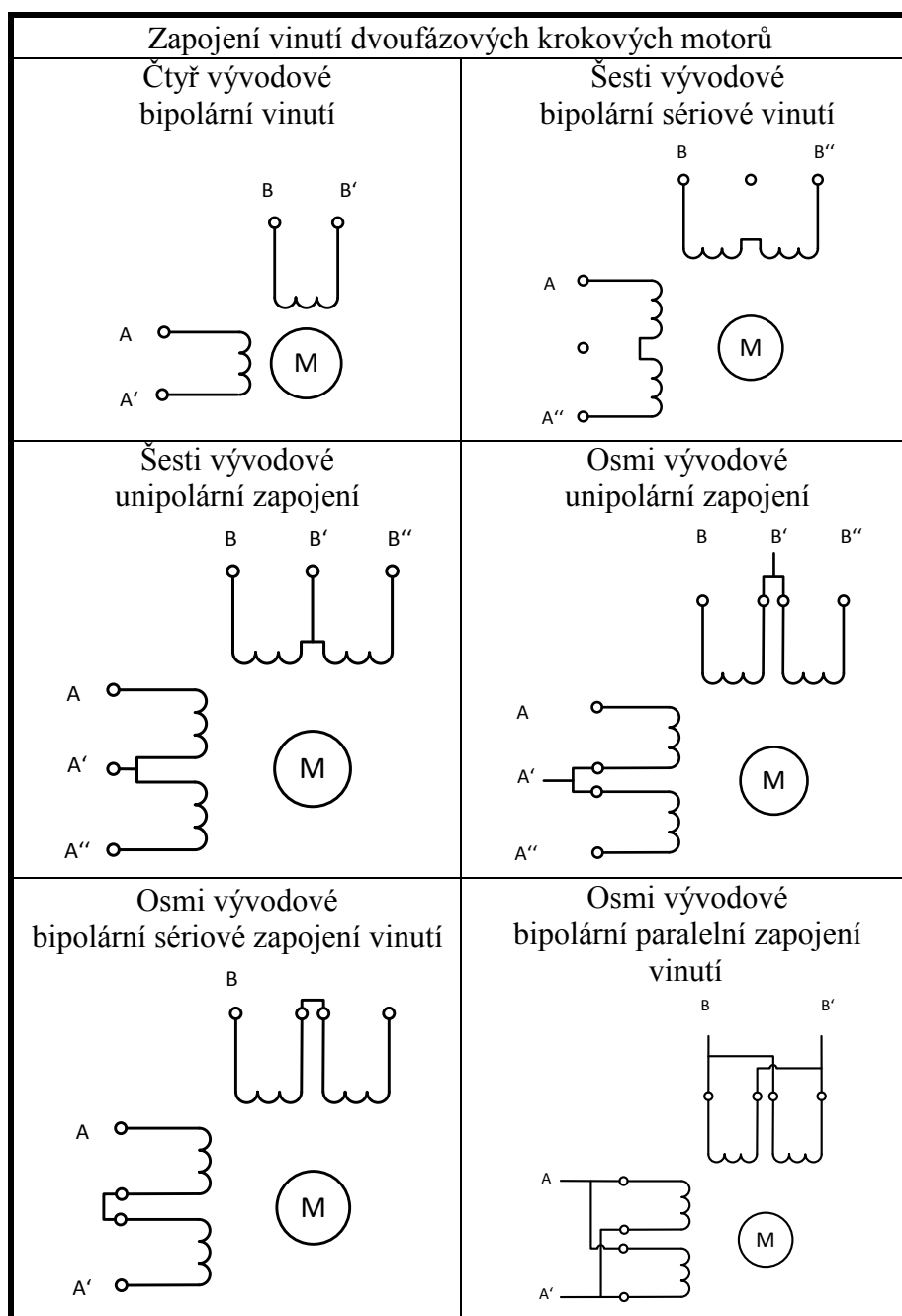
Pro názornou ilustraci výhod proudového napájení slouží následující porovnání momentových charakteristik obou typů napájení.



Obr. 40 – porovnání způsobů napájení krokových motorů

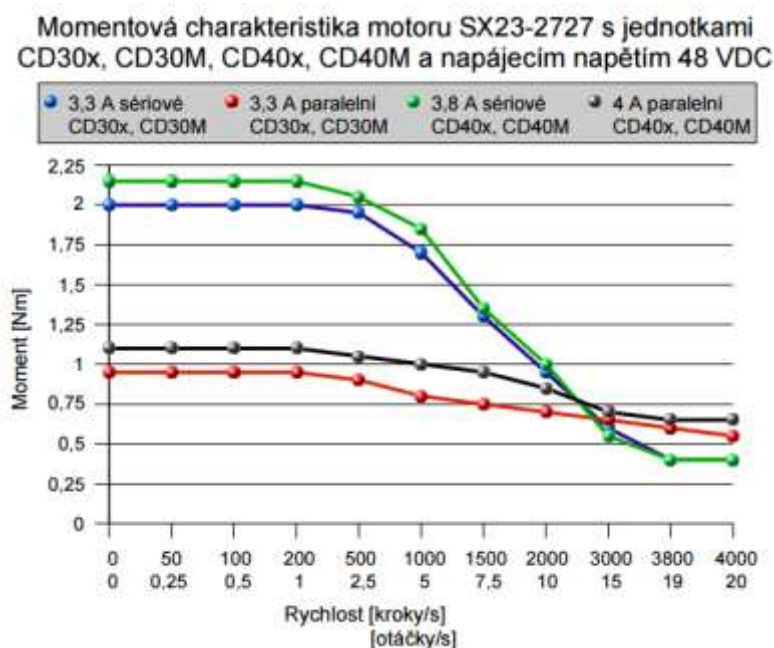
Dvoufázové krokové motory

Vyrábějí se se dvěma typy vinutí: unipolární a bipolární, speciální variantou je pak vinutí bifilární. Bipolární vinutí lze poznat podle čtyř vývodů, vyžaduje bipolární buzení, tedy použití plného H-můstku na jednu fázi. Unipolární vinutí se vyskytuje zpravidla s vyvedeným středem, pro jeho buzení stačí 1 tranzistor na část vinutí jedné fáze. Největší flexibilitu umožňuje unipolární dvoufázové vinutí s vyvedenými všemi začátky a konci vinutí. Lze poznat podle 8 vývodů a je ho možné zapojit jak bipolárně tak unipolárně, lze navíc vybrat mezi sériovým a paralelním zapojením. Volba paralelního nebo sériového zapojení závisí na vlastnostech napájecího měniče a jeho proudovém a napěťovém namáhání a má vliv na moment motoru. Viz *Obr. 41 - momentová charakteristika motoru SX23-2727*.



Tabulka 5 – typy vinutí 2f krokových motorů

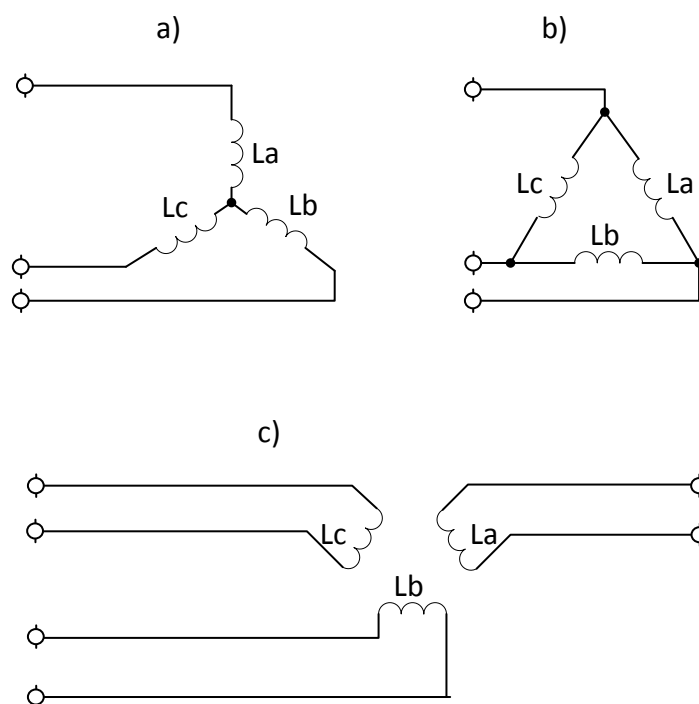
Moment motoru je také závislý na způsobu napájení a buzení. Pro ilustraci je použita momentová charakteristika krokového motoru SX23-2727. Z obrázku je patrné, že největšího momentu je dosaženo v případě sériového zapojení vinutí. Necnost tohoto způsobu je však rapidní pokles jmenovitého momentu ve vyšších otáčkách. Zapojení paralelní vykazuje sice poloviční moment, zato je znatelně méně závislé na otáčkách.



Obr. 41 - momentová charakteristika motoru SX23-2727 [32]

Trojfázové krokové motory

Trojfázové krokové motory se používají pro náročnější pohony, bylo zjištěno, že se více hodí do struktury řízení se zpětnou vazbou. Vykazují větší dynamiku a menší reluktanční moment [11]. Možná zapojení 3f krokových motorů jsou na následujícím obrázku. V případě a) a b) je motor připojen k třífázovému tranzistorovému měniči stejné topologie jako například pro 3f asynchronní motor, jen s jiným způsobem řízení a v případě c) je motor připojen nejlépe k třem plným H-můstkům.



Obr. 42 - Zapojení do hvězdy a trojúhelníka 3f krokového motoru [17]

9.2.3.3 Buzení 2 fázových krokových motorů

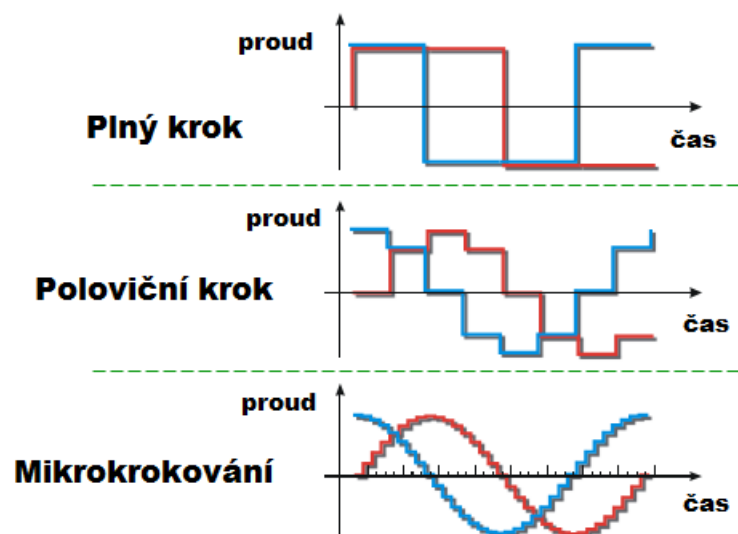
Stejně jako existuje unipolární a bipolární vinutí tak existuje i unipolární a bipolární styl buzení. Při unipolárním buzení se na vinutí objevují napěťové pulzy pouze jedné polaritě. Vyžaduje nejméně jednoho spínacího prvku na polovinu fáze. Bipolární buzení umožňuje napájet vinutí oběma polaritami napětí zdroje. Vyžaduje však zapojení plného můstku tedy čtyř spínacích prvků na fázi. Unipolární zapojení má oproti bipolárnímu tu nevýhodu, že vzhledem k jedné polaritě napájecího napětí lze na pólu vybudit pouze jednu polaritu magnetického pole. Tuto nevýhodu konstrukčně odstraňuje bifilární vinutí. Pak lze pomocí dvou spínacích prvků na fázi vybudit na pólu obě polaritě magnetického pole.

Budiče 2 fázových krokových motorů [17]		
Unipolární buzení jedné fáze	Bipolární buzení jedné fáze	Bipolární buzení bifilárního vinutí jedné fáze

Tabulka 6 - budiče krokových motorů

Způsoby buzení krokových motorů

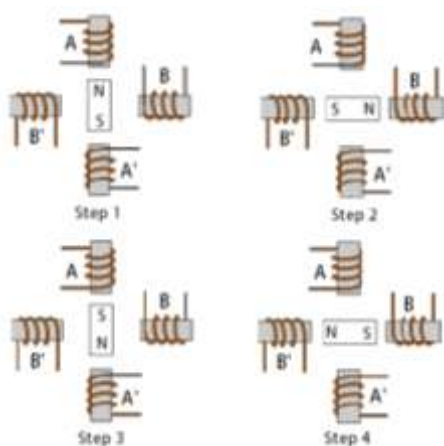
Pomocí moderní číslicové techniky lze krokové motory řídit různými způsoby krokování: plný krok, poloviční krok a mikrokrokování.



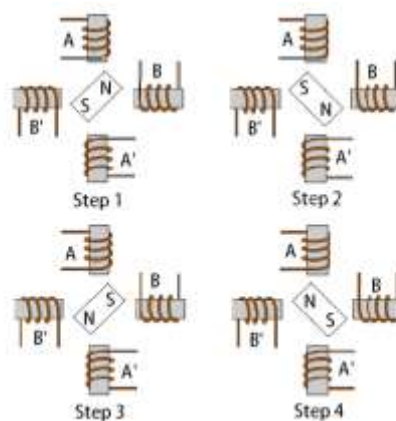
Obr. 43- způsoby buzení krokových motorů [11]

■ Plný krok

Při buzení plným krokem se motor otáčí se základním krokem daným konstrukcí motoru, u 2f motorů to nejčastěji bývá $1,8^\circ$ při 200 krocích na otáčku. Existují dva typy buzení plným krokem – **plný krok s jednofázovým napájením**, kdy je v každém okamžiku buzena pouze jedna fáze a **plný krok s dvoufázovým napájením**, kdy v každém okamžiku jsou buzeny dvě fáze najednou. Dvoufázové napájení přináší o 30-40% větší moment než jednofázové [25].



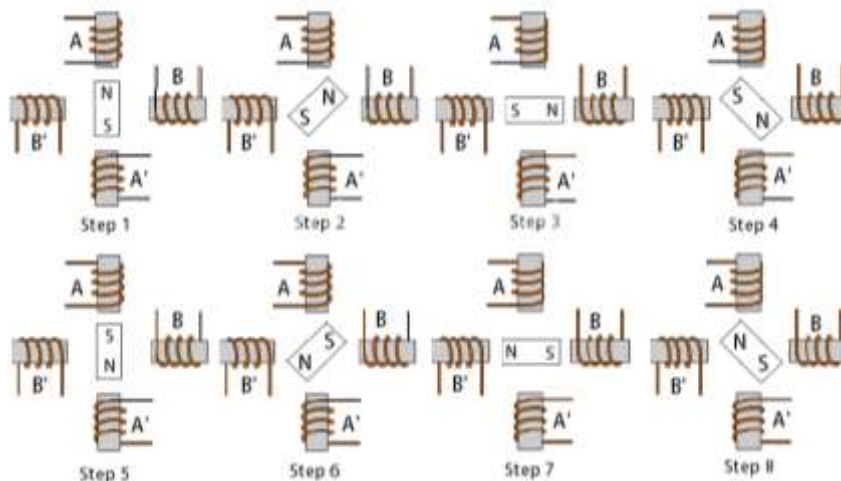
Obr. 44 - plný krok 1f buzení [26]



Obr. 45 - plný krok 2f buzení [26]

■ Poloviční krok

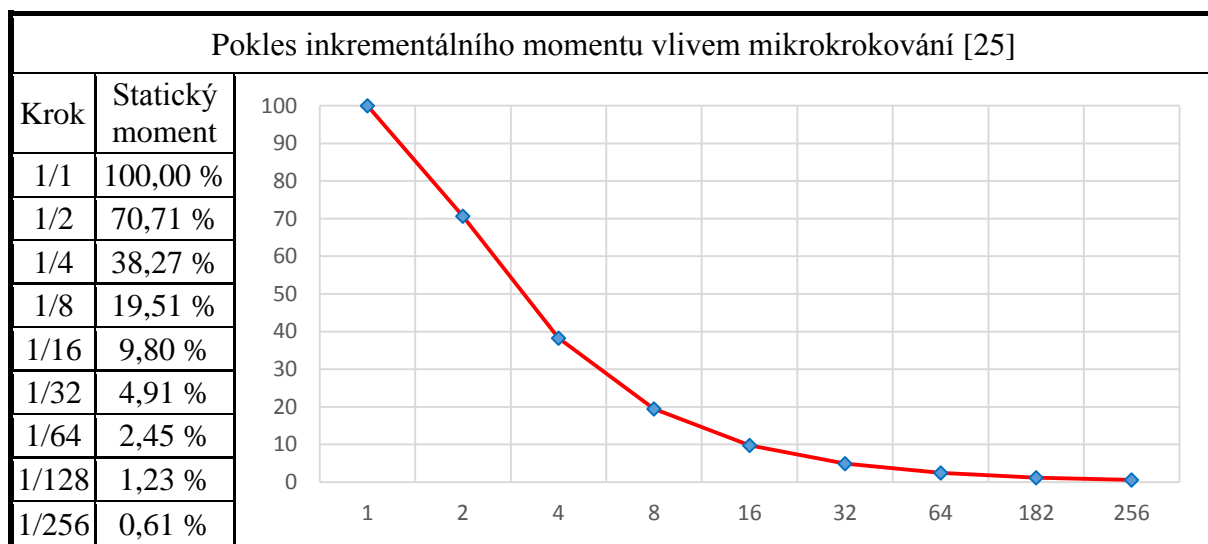
Nazývá se také půlkrokování a vznikne kombinací dvou předešlých způsobů. Přepíná se mezi jednofázovým a dvoufázovým plným krokem a výsledkem jsou kroky o velikosti poloviny základního kroku, což přináší dvojnásobný počet kroků na otáčku a tedy dvojnásobné rozlišení. Půlkrokování poskytuje bohužel o 15% menší výsledný střední moment, oproti dvoufázovému plnému kroku. Tento pokles je možno částečně kompenzovat zvýšením fázového proudu v okamžicích buzení jedné fáze [25].



Obr. 46 - poloviční krok [26]

▪ Mikrokrokování

Mikrokrokování je technika buzení krokových motorů, při které dochází k dalšímu dělení základního kroku na $1/4$, $1/8$, $1/16$, $1/32$ až $1/256$. Toho je docíleno řízením směru i amplitudy fázového proudu každým vinutím. Touto metodou lze při krokování $1/256$ u motorů se základním krokem $1,8^\circ$ rozdělit jednu otáčku na 51 200 kroků. Schodovitý průběh fázových proudů připomíná tvar sinusovky. Není to náhoda, mikrokrokování vychází z myšlenky buzení 2f bipolárních krokových motorů nízkofrekvenční sinusovkou. Jak již to však v technice bývá, každé pro má i své proti. Mikrokrokování se vyznačuje opravdu rapidním poklesem inkrementálního momentu [25].



Tabulka 7 - pokles momentu krokového motoru vlivem metod mikrokrokování



10 PARAMETRY KONSTRUOVANÉ TISKÁRNY

Základní parametry tiskárny:

- Výrobní prostor $400 \times 400 \times 500$ mm (x, y, z)
- Pohon - krokové motory
- Projektovaný počet extrudérů: 3
- Uzavřený izolovaný výrobní prostor s možností vyhřívání a regulace teploty
- Projektovaná rychlost tisku 100mm/s (v rámci možností i víc, záleží na extrudéru)
- Maximální rychlost rychloposuvu 300 mm/s
- Maximální rozlišení vrstvy (osy Z) $25 \mu\text{m}$ / $1,6 \mu\text{m}$ (plný krok/mikrokrok)
- Rozlišení v osách XY $157 \mu\text{m}$ / $9,817 \mu\text{m}$ (plný krok/mikrokrok)
- Maximální hmotnost zatížení v ose Z 20 kg

Doplňkové funkce:

- Ovládací panel s LCD displejem a rotačním enkodérem pro ovládání
- RGB led na čelním panelu pro názornou signalizaci stavu tiskárny
- LED signalizace chodu topných elementů
- „Run out“ senzor filamentu
- Softwarové nastavování fázových proudů
- Softwarové nastavování mikrokrokování

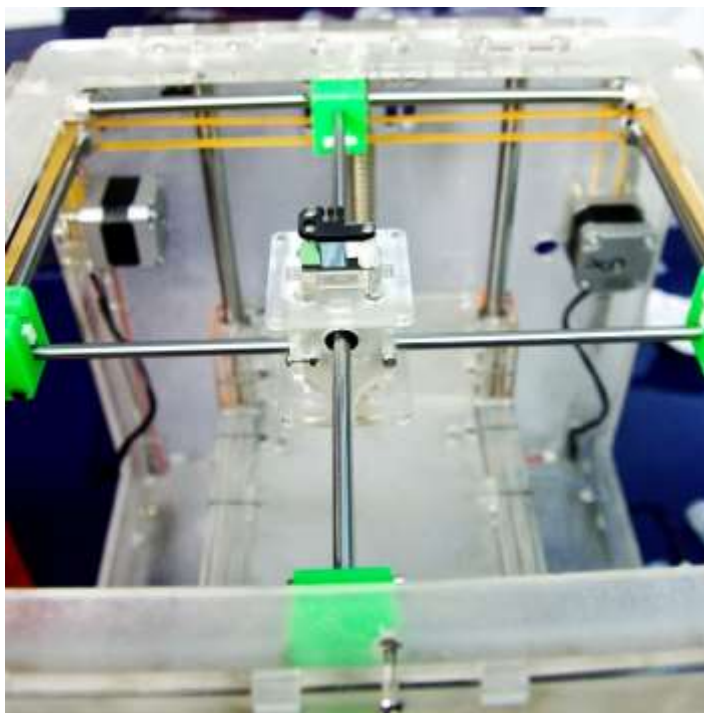
11 HLAVNÍ KOMPONENTY TISKÁRNY

11.1 Pohony os

Tato kapitola se bude týkat mechanických záležitostí nutných k návrhu pohonů tiskárny. Především tedy půjde o určení potřebných parametrů motorů pro pohon jednotlivých os.

Hluběji se pak mechanickým výpočtům a návrhu věnuje jiná diplomová práce, ve které je mimo jiné vytvořen trojrozměrný model tiskárny a na jeho podkladech vypočítány přibližné hmotnosti poháněných os.

Tiskárna bude pracovat v Kartézském souřadném systému, tisková hlava se bude pohybovat v rovině XY a nosná deska v ose Z. V rovině XY byl zvolen netradiční typ kinematiky, někdy nazývaný jako paralelní, nebo také kinematika Ultimaker³.



Obr. 47 - paralelní kinematika os X a Y

Pro pohon os X a Y bude použit řemenový poháněcí mechanismus. Z principu zvolené kinematiky, kdy extrudér se pohybuje v rovině XY a nosná deska se po jednotlivých vrstvách pohybuje v ose Z, jsou kladeny požadavky na dynamiku pohybu pouze v osách X a Y. Osa Z se pohybuje pouze jednou za jednu vrstvu o vzdálenost jedné vrstvy. Je navrhována na statický moment, nutný k udržení nosné desky s výrobkem ve stabilní poloze. Osa Z je poháněna kuličkovým šroubem, který má veliký převodový poměr a tak se potřebný přídržný moment podstatně redukuje.

³ Pojmenovaná podle stejnojmenného výrobce 3D tiskáren z Holandska, který tento typ kinematiky využívá.



Protože z principu technologie FDM nevzniká žádné statické zatížení při „obrábění“, budou motory pro pohon os navrženy pouze na dynamický moment potřebný pro zrychlení setrvačných hmot.

Ze znalosti momentové charakteristiky krokového motoru je patrné, že moment s rostoucími otáčkami rapidně klesá. Protože ztráty kroků jsou nepřipustné, musí být okamžitý moment motoru vždy větší než zatěžovací dynamický moment. A to i v nejhorší možné situaci, kterou jest osa pohybující se maximální rychlostí v okamžiku požadavku na zpomalení s maximálním možným zrychlením. Jinak řečeno, při navrhování momentu pohonu nelze pracovat jen se statickým zatěžovacím momentem, nýbrž s momentovou charakteristikou motoru a z předem dané maximální rychlosti otáčení určit moment, jenž je schopen motor v daném pracovním bodě vyvinout.

Při návrhu potřebného momentu motoru se vychází z pohybové rovnice:

$$M_{mot} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_s \quad (11.1)$$

M_{mot} – potřebný moment motoru [Nm]; J – moment setrvačnosti poháněných hmot včetně rotoru [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]; $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon$ – úhlové zrychlení [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$]; M_s – statický zatěžovací moment [Nm]

Pro CNC obráběcí stroje se běžně volí lineární zrychlení $a = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Lineární zrychlení lze přepočítat na úhlové zrychlení ze znalosti poloměru osy otáčení podle vztahu [16]:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{10}{0,01} = 1000 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (11.2)$$

r – poloměr poháněcího ozubeného kola [m], a – lineární zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

Osa X a Y

Hmotnost plně vybavené tiskové hlavy samotné v případě tří extrudérů vychází okolo 1kg plus další mechanické díly jako například nosné tyče. Návrh pohonů bude proveden pro 2kg hmotnost osy X a to samé platí pro osu Y.

Převést hmotnost osy na rotační moment setrvačnosti z pohledu motoru lze podle vztahu [16]:

$$J_o = m \cdot r^2 = 2 \cdot 0,01 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (11.3)$$

J_o – redukovaný moment setrvačnosti lineárně se pohybujících hmot [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

Celkový moment setrvačnosti se skládá z momentu setrvačnosti osy a vlastního momentu setrvačnosti rotoru motoru:

$$J_{celk} = J_o + J_{mot} = 2 \cdot 10^{-4} + 0,275 \cdot 10^{-4} = 2,275 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (11.4)$$

Požadovaný dynamický moment motoru:

$$M_{mot} = J_{celk} \cdot \frac{d\omega}{dt} = 1000 \cdot 2,275 \cdot 10^{-4} = 0,228 \text{ Nm} \quad (11.5)$$

Maximální projektová rychlost lineárního pohybu je $v_{\max} = 314 \text{ mm/s}$. Tato rychlost odpovídá při zvolené konfiguraci pohonného ústrojí 1000 pps. Při této rychlosti otáčení má zvolený motor SX24-2341 moment 2 Nm. To je osmkrát více než vypočtený dynamický moment. V úvahách však nebyl zahrnut fakt, že motor bude napájen polovičním napětím, což na 1000 pps přinese určitě nějaký pokles momentu. Při výpočtu byl také zanedbán statický moment způsobený třením a tak bude zajištěna dostatečná momentová rezerva a předejde se ztrátám kroku, případně se bude moc tiskárna pohybovat s větším zrychlením. Třeba také podotknout, že jmenovitý moment je motor schopen generovat při plném buzení (kroku). Při mikrokrokování moment motoru rapidně klesá, viz kapitola 9.2.3.3 *Buzení 2 fázových krokových motorů*.

Osa Z

Jak již bylo řečeno, na osu Z nejsou kladeny žádné nároky na dynamiku. Pohon osy Z je navržen na statický moment, potřebný k udržení výrobku ve stabilní poloze. Kompromisem bylo zvoleno maximální zatížení v ose Z na 20 kg (to bude znamenat jistá omezení při volbě procentuální výplně plných výrobků). Při výpočtu statického zatěžovacího momentu se dá vyjít ze zákona zachování výkonu:

$$P = M \cdot \omega = F \cdot v \quad (11.6)$$

$$M = \frac{F \cdot v}{\omega} = \frac{m \cdot g \cdot v}{\omega} = \frac{20 \cdot 9,81 \cdot 0,314}{2\pi \cdot 5} = 1,96 \text{ Nm} \quad (11.7)$$

M – točivý moment rotačního pohybu [Nm]; ω – úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]; F – lineární síla [N]; g – tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]; v – rychlost lineárního pohybu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

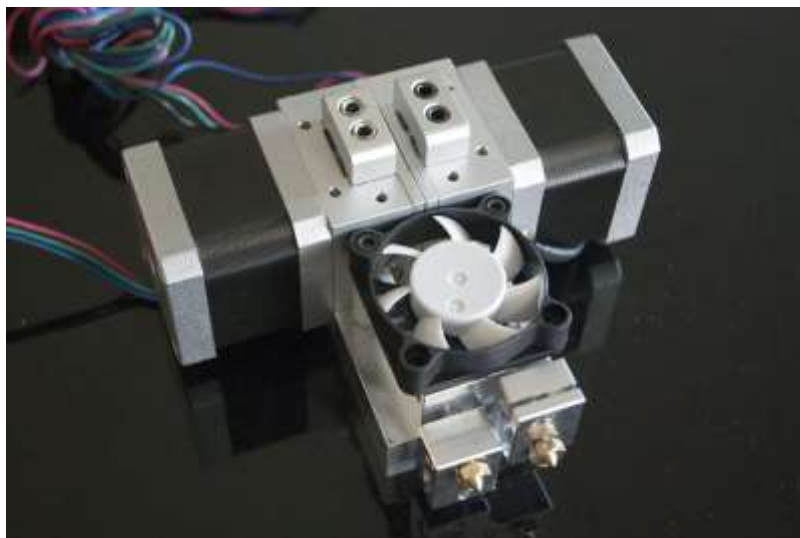
11.2 Extrudér

Tiskárna je projektována na použití tří extrudérů se záměrem možnosti tříbarevného RGB tisku. Jako příklad je uveden Diamond hot end, který obsahuje pouze jednu trysku, do které vstupují 3 filamenty.



Obr. 48 - hot end Diamond

Z počátku bude tiskárna osazena hot endem E3D Chimera. Tento hot end umožňuje dvoubarevný tisk a na rozdíl od Diamondu má dvě separované trysky. Výhodou oddělených trysek je možnost simultánního tisku hlavního a podpůrného filamentu z dvou odlišných materiálů, nebo tisknout jeden materiál s dvěma průměry trysek.



Obr. 49 - E3D Chimera s cold endy Bulldog

11.2.1 Elektrické parametry extrudéru

Hot end

E3D hot end

Parametry:

$$U = 24 \text{ V}$$

$$P = 40 \text{ W}$$

$$I = 1,66 \text{ A}$$



Obr. 50 - sestavený hot end E3D V6

Cold end

Cold end extrudéru obsahuje krokový motor NEMA 17 s planetovou převodovkou v poměru 5:1 a 12 V ventilátor s rozměry minimálně 30×30 mm. Proudový odběr ventilátoru bývá v rozmezí 50 ÷ 100 mA. Krokový motor pro dávkování filamentu má následující parametry:

- Příruba NEMA 17 + planetová převodovka
- Jmenovitý fázový proud 1,68 A
- Jmenovitý statický moment 1,68 Nm
- Hmotnost 240 g
- Třída elektrické izolace B ($v_{\max} = 130\text{ °C}$)
- Základní krok $1,8^\circ$



Obr. 51 - krokový motor NEMA 17 s planetovou převodovkou

Ze zkušeností provozovatele tiskárny jsou doporučené maximální otáčky ozubeného kola extrudéru 1 otáčka za sekundu. Tomu odpovídá přes převod 5 s^{-1} otáčky motoru, při 200 pulzech na otáčku je to 1000 pps.

11.3 Vyhřívání deska

Vyhřívání deska MK2B, byla vyvinuta Josefem Průšou v rámci projektu RepRap pro tiskárnu Prusa I3 [10] a dodnes je jednou z nejrozšířenějších desek. Dá se pořídit za 200 Kč z Číny. Je možné ji napájet jak 12 V tak 24 V. V principu se nejedná o nic jiného než o desku plošných spojů meandrovitého tvaru, kde topným elementem je vlastní měděný vodič. Její rozměry jsou 200×200 mm, v konstruované tiskárně tak budou použity 4.

MK2B vyhřívaná deska (heated bed)

Parametry:
 $U = 24 \text{ V}$
 $R = 3 \div 3,4 \text{ A}$
 $I = 8 \text{ A}$
 $P = 200 \text{ W}$



Obr. 52 - MK2B vyhřívaná nosná deska

11.4 Vyhřívání komory

Vyhřívání komory bude funkcionalita tiskárny, která bude experimentálně doladěna v průběhu ožiování a provozu tiskárny. Pro návrh elektroniky tento fakt přináší navíc potřebu jednoho výstupu pro topný element, analogový vstup pro termistor za účelem regulace teploty komory a případný ventilátor pro zajištění cirkulace vzduchu.

11.5 Síťový napájecí zdroj

Napájecí napětí interface je zvoleno s ohledem na co možná nejtvrdší momentovou charakteristiku krokových motorů. Čím větším napětím je napájen krokový motor (v jistých mezích) tím je docíleno větší tvrdosti jeho momentové charakteristiky ve vyšších otáčkách. Napájecí napětí driverů krokových motorů pracujících na principu PWM regulace fázových proudů se volí až 8 ÷ 10 krát větší, než je jmenovité napětí samotného motoru [19]. Napětí pro napájení interface je v rozsahu 12 V ÷ 40 V. Při hodnotách napětí vyšších než 24 V je nutné softwarově omezit maximální střidy napětí pro napájení topných elementů dimenzovaných na 24 V.

Pro návrh výkonu napájecího zdroje je nutné analyzovat dva základní stavy tiskárny. Za jeden stav lze považovat přípravu pro tisk. V tomto režimu všechny pohony stojí, v provozu jsou pouze všechny topné elementy, které se zahřívají na provozní teplotu.

Fáze jedna - příprava tisku				
	Počet	U[V]	P[W]	P _c [W]
Nosné desky	4	24	192	768
Trysky	3	24	40	120
Celkem				888

Tabulka 8 – kalkulace spotřeby při přípravné fázi tisku - zahřívání

Za druhý stav je považován probíhající tisk. V provozu jsou teď pohony na plný výkon, topné elementy jsou odhadovány na poloviční výkon.

Fáze dvě - tisk				
	Počet	U[V]	P[W]	P _c [W]
Pohony os	3	24	100	300
Pohony extrudérů	3	24	40	120
Ventilátory	4	12	6	24
Nosné desky	4	24	96	384
Trysky	3	24	20	60
Celkem				888

Tabulka 9 - odhad spotřeby při tisku

Uvedené úvahy však nelze považovat za dogma, jelikož situace kdy by všechny pohony jely na plný výkon, nikdy nenastane. Výkon odebíraný pohony bude mít spíš pulzní charakter, k pokrytí těchto výkonových pulzů slouží elektrická energie uložená v kondenzátorech. Stejně tak výkon topných elementů v uzavřené komoře lze v současné chvíli jen odhadovat, na tepelné simulace není v rámci diplomové práce prostor. Volba řádného napájecího zdroje tedy bude provedena až po sléze při zkušebním provozu tiskárny.



Obr. 53 - průmyslový napájecí zdroj 24 V, 700 W

12 NÁVRH INTERFACE

12.1 Driver krokových motorů pohonů os

Zvolený integrovaný obvod pro řízení krokových motorů pro pohon os je od firmy Toshiba Semiconductors **TB6600HG**.

Základní parametry jsou, převzato z datasheetu [13]:

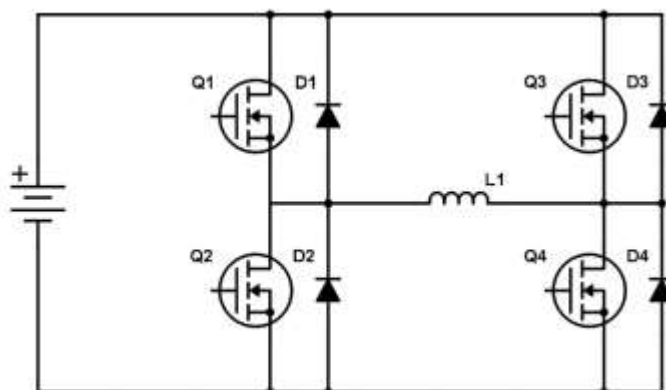
- Napájecí napětí $8 \div 42 \text{ V}$
- Jmenovitý proud fáze $4,5 \text{ A}$ (5 A špičkově)
- Napětí digitálních vstupů $U_{in,L} = -0,2 \div 0,8 \text{ V}$;
 $U_{in,H} = 2 \div 5,5 \text{ V}$ ($\sim \text{TTL}$)
- Spínací frekvence PWM $20 \div 60 \text{ kHz}$
(nastavitelná externím rezistorem)
- Mikrokrokování $1/1$; $1/2$; $1/4$; $1/8$; $1/16$;
- Teplotní ochrana, podpěťová ochrana,
nadproudová ochrana
- *Trough hole* pouzdro s teplosměnnou kovovou
plochou pro umístění na chladič



Obr. 54 - TB6600HG

Integrovaný obvod TB6600HG je jednočipový driver dvoufázových krokových motorů, umožňující sinusové mikrokrokování. Regulace proudu je interně zajištěna pulzně šířkovou modulací výstupního fázového napětí [13].

Na jednom čipu křemíku jsou dva plné H-můstky včetně budičů, vstupní logiky a ochranných obvodů, společně také s analogovou regulační strukturou proudových smyček. Pro představu je na následujícím obrázku uveden jeden čtyřkvadrantový měnič, neboli H-můstek, napájející jednu fázi krokového motoru.



Obr. 55 – jeden 4 kvadrantový měnič, plný most, full bridge, H-bridge, H-můstek

Styl řízení je krok/směr. To znamená, jedním binárním signálem se určuje směr otáčení, druhým binárním signálem se udávají kroky. Jeden pulz obdélníkového signálu na vstup krok znamená jeden krok motoru. Frekvencí pulzů je pak dána rychlost otáčení motoru.



12.1.1 Připojení k CPU

Digitální signálové vstupy jsou TTL kompatibilní a doporučené aplikační schéma nevyžaduje pro připojení k CPU žádné další speciální požadavky, obvod bude tedy přímo připojen k procesoru. Napřímo budou k CPU připojeny pouze vstupy krok, směr a povolovací vstup.

Nastavování režimu krokování bude v základu realizováno pomocí DIP přepínačů. Čtyřbitový přepínač u každého driveru osy bude umožňovat nastavení pro každou osu zvlášť. Nastavování maximálních fázových proudů bude v základu umožněno pomocí analogového potenciometru.

Jako doplňková funkcionálníta bude možné provádět tyto nastavení i softwarově. Pro nastavování krokování je z důvodů nedostatku IO portů CPU použit 16 bitový expandér GPIO vstupů a výstupů komunikující po I²C sběrnici. Důvodem implementace softwarového nastavování krokování je známý negativní jev mikrokrokování a tím je rapidní pokles momentu motoru. Tedy například při rychloposuvech, bude možné nastavit plný krok a pohybovat se tak s plným momentem a tedy bude možné si dovolit větší dynamiku, což ve výsledku znamená větší rychlost tisku. Tato funkcionálníta však bude vyžadovat menší či větší softwarové úpravy, možná i od tvůrců firmwaru, proto není považována za základní funkcionálnítu.

Softwarové nastavování fázových proudů bude možné pomocí digitálního potenciometru také po I²C sběrnici. Tato funkcionálníta bude umožňovat v jistých fázích pohybu dovolovat větší proud motorů špičkově i větší než jmenovitý a pohon tak krátkodobě přetěžovat. Umožňuje to opět větší dynamiku a rychlost tisku.

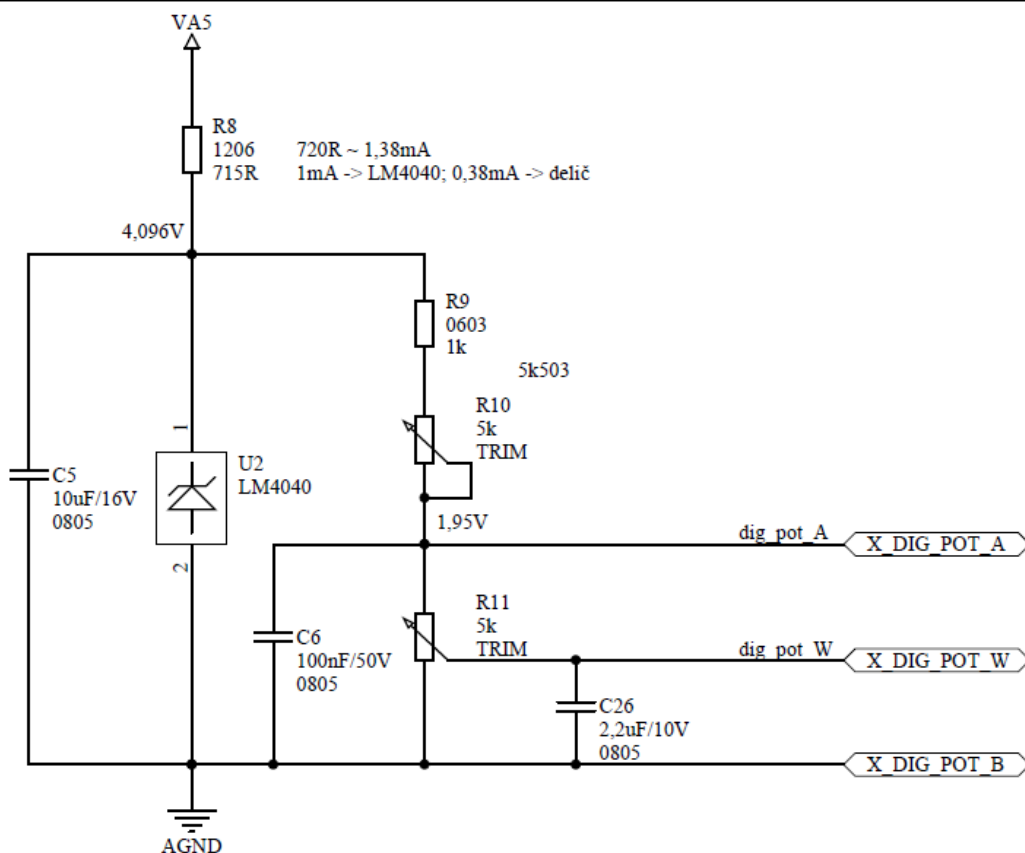
12.1.2 Nastavování maximálního fázového proudu

Jak již bylo řečeno, proudovou regulaci zajišťuje již samotný integrovaný driver. Fázové proudy jsou snímány bočníky, jejichž velikost je od výrobce doporučováno volit v rozmezí $0,11 \Omega < R_{NF} < 0,5 \Omega$ [13]. Maximální fázový proud se nastavuje velikostí napětí na vstupním pinu V_{REF} . Velikost referenčního napětí se doporučuje volit v rozmezí $0,3 \text{ V} < V_{REF} < 1,95 \text{ V}$ [13]. Proudový odběr vstupu V_{REF} je $1 \mu\text{A}$ [13]. Nastavování napětí na tento vstup bude realizováno odporovým děličem, spodní rezistor bude proměnný a to buď hardwarově pomocí klasického potenciometru, nebo softwarově a to pomocí digitálního potenciometru.

Velikost fázového proudu je dána vztahem [13]:

$$I_{f,max} = \frac{\frac{1}{3} \cdot U_{REF}}{R_{NF}} \quad (12.1)$$

Velikost maximálního fázového proudu závisí na velikosti bočníku a na velikosti nastaveného napětí U_{REF} .



Obr. 56 – schéma obvodového řešení pro nastavení ref. napětí V_{ref}

Obrázek je vystřižen ze schématické dokumentace, označení elektrických komponent nekorespondují s označením v textu.

Návrh děliče

Jedná se o odporový dělič zatížený a je dimenzován tak, aby proud nezatíženým děličem byl nejméně 100 krát větší, než proud zátěže. Proud zátěže je v tomto případě $I_{VREF} = 1 \mu A$. Proud nezatíženého děliče je tedy zvolen na $I_0 = 1 \text{ mA}$ (s rezervou). Z důvodů omezení napětí U_{REF} na 1,95 V bude dělič napájen ze 4 V referenčního napětí. Dělič bude navržen tak, aby při maximální hodnotě proměnného rezistoru bylo na výstupu maximálně 1,95 V.

Celková hodnota odporů děliče tak, aby byla dodržena vstupní podmínka dostatečné tvrdosti:

$$R_1 + R_2 > \frac{U_{R12}}{I_0} = \frac{4}{0,001} = 4000 \Omega \quad (12.2)$$

Vybraný digitální potenciometr se však vyrábí nejméně 5 k Ω . Minimální konfigurace tedy vychází zhruba 10 k Ω . Při tomto odporu bude proud děliče naprázdno:

$$I_0 = \frac{U_{R12}}{R_{celk}} = \frac{4}{10000} = 400 \mu A \quad (12.3)$$

To již sice nesplňuje původní požadavek na 1 mA, ale i 400 násobně větší proud naprázdno představuje dostatečnou tvrdost děliče, navíc nedostatečná tvrdost děliče pokazí pouze nelinearitu převodu děliče, což v tomto případě vyloženě nevádí.



Velikost potenciometru R_2 je daná a to 5 k Ω . Velikost R_1 je navržena s ohledem na maximální velikost napětí $U_{REF,max} = 1,95$ V.

$$U_{R1,min} = U_{R12} - U_{REF,max} = 4,096 - 1,95 = 2,146 \text{ V} \quad (12.4)$$

$$\frac{U_{R1}}{U_{REF}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (12.5)$$

$$R_1 = \frac{U_{R1,min}}{U_{REF,max}} \cdot R_2 = \frac{2,146}{1,95} \cdot 5 = 5,503 \text{ k}\Omega \quad (12.6)$$

Proud děličem bude v takovéto konfiguraci:

$$I_0 = \frac{U_{R12}}{R_1 + R_2} = \frac{4,096}{5000 + 5503} = 390 \text{ }\mu\text{A} \quad (12.7)$$

Kontrola maximálního napětí U_{REF} :

$$U_{REF,max} = I_0 \cdot R_{2,max} = 390 \cdot 10^{-6} \cdot 5000 = 1,95 \text{ V} \quad (12.8)$$

Návrh bočníku

Velikost bočníku je požadována od výrobce driveru $0,11 \text{ }\Omega < R_{NF} < 0,5 \text{ }\Omega$. Velikost bočníku je zvolena s ohledem na maximální špičkový fázový proud driveru:

$$I_{f,max} = \frac{\frac{1}{3} \cdot U_{REF}}{R_{NF}} \quad (12.9)$$

$$R_{NF} = \frac{\frac{1}{3} \cdot U_{REF}}{I_{f,max}} = \frac{1,95}{5} = 0,13 \text{ }\Omega \quad (12.10)$$

Ztrátový výkon na bočníku při maximálním efektivním proudu:

$$\Delta P = R_{NF} \cdot I_{f,stř,max}^2 = 0,13 \cdot 4,5^2 = 2,63 \text{ W} \quad (12.11)$$

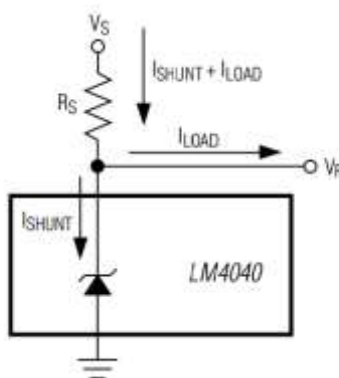
Po dlouhém pátrání po vhodném bočníku byl zvolen bočník s hodnotou 0,125 Ω a z důvodů ztrátového výkonu bude složen ze dvou 0,25 Ω / 2 W SMD rezistorů.

Maximální proud při zvolené hodnotě bočníku:

$$I_{f,max} = \frac{\frac{1}{3} \cdot U_{REF}}{R_{NF}} = \frac{\frac{1}{3} \cdot 1,95}{0,125} = 5,2 \text{ A} \quad (12.12)$$

Napěťová reference

Pro vytvoření stabilní napěťové reference k napájení děliče je použit dvou vývodový integrovaný obvod LM4040-4.1, jehož vlastnosti se přibližují k vlastnostem ideální Zenerovy diody. Oproti diodě je teplotně stabilnější a má strmější VA charakteristiku. Napěťová reference má pro tuto aplikaci hodnotu 4,096 V.



Obr. 57 - LM4040 referenční zapojení [15]

I_{LOAD} neboli proud odebíraný z regulátoru pro napájení napěťového děliče:

$$I_{LOAD,min} = 0,39 \text{ mA} \quad (12.13)$$

Napětí U_S je napětí pěti voltové analogové sběrnice, stabilizované lineárním stabilizátorem a nebude se nějak významně měnit, a tudíž není třeba změnu při návrhu stabilizátoru uvažovat.

Volba R_S [15]:

$$\frac{U_{s,min} - U_R}{60\mu\text{A} + I_{load,max}} > R_S > \frac{U_{s,max} - U_R}{20\text{mA} + I_{load,min}} \quad (12.14)$$

$$\frac{5 - 4}{60 \cdot 10^{-6} + 390 \cdot 10^{-6}} = 2222,22 \Omega > R_S > \frac{5 - 4}{20 \cdot 10^{-3} + 0,39 \cdot 10^{-3}} = 49,044 \Omega \quad (12.15)$$

$$2,22 \text{ k}\Omega > R_S > 49,044 \Omega \quad (12.16)$$

Ztrátový výkon:

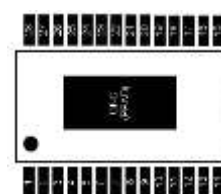
$$\frac{(5 - 4,096)^2}{2222,22} = 0,367 \text{ mW} > \Delta P_R = \frac{U^2}{R} > \frac{(5 - 4,096)^2}{49,044} = 16,66 \text{ mW}$$
$$0,367 \text{ mW} > \Delta P_R > 16,66 \text{ mW}$$

Zvolený rezistor 715 Ω / 100 mW.

12.2 Driver krokových motorů pohonů extrudérů

Pro pohon extrudérů budou v každém případě použity menší motory než na pohon os. Proto byl z cenových důvodů zvolen driver od Texas Instruments **DRV8825** jehož základní parametry jsou následující [14]:

- Napájecí napětí 8,2 ÷ 45 V
- Jmenovitý fázový proud 2 A
- Napětí digitálních vstupů $U_{in,L} = 0 \div 0,7 \text{ V}$;
 $U_{in,H} = 2 \div 5,25 \text{ V}$ (~ TTL)
- Maximální frekvence pulzů 250 kHz
- Frekvence PWM 30 kHz
- Mikrokrokování 1/1; 1/2; 1/4; 1/8; 1/16, 1/32;
- Teplotní ochrana, podpět'ová ochrana, nadproudová ochrana
- SMD pouzdro s rozměry TSOP-28, navíc doplněné o tzv. PowerPAD, což je kovová plocha na spodní straně integrovaného obvodu určená k odvodu tepla do DPS



Obr. 58 - DRV8825PWP

Nastavování krokování se bude provádět pro všechny extrudéry společným DIP přepínačem nebo z IO portů expandéru. Nebude možné pro pohony extrudérů nastavit různé krokování. Není taky proč.

12.2.1 Nastavování maximálního fázového proudu

Nastavování fázového proudu probíhá stejně jako u driveru pro pohon os. Taktéž zde bude možnost hardwarového i softwarového nastavování velikosti fázového proudu. A protože může být požadavek na odlišné motory extrudéru, proud bude možné nastavit individuálně.



Nastavená velikost fázového proudu je dána vztahem [14]:

$$I_{f,max} = \frac{\frac{1}{5} \cdot U_{REF}}{R_{NF}} \quad (12.17)$$

Návrh děliče

Postup je stejný jako u driveru pro pohon os. Jediná odlišnost kvůli většímu rozpětí U_{REF} bude dělič napájen z 10 V, jenž bude vytvořeno jako u pohonů os referencí LM4040-10 napájené z 12 V. Napětí 12 V zajišťuje integrovaný spínaný regulátor napětí, pro jistotu bude tedy stabilizátor napájen přes odrušovací tlumivky. Obvodové řešení je stejné jako v případě os, jen napájecí rezistor pro LM4040 je doplněn o filtrační tlumivky. Velikost potenciometru R_2 je opět daná a to 5 kΩ. Velikost R_1 je navržena s ohledem na maximální velikost napětí $U_{REF,max} = 3,5$ V [14].

$$U_{R1,min} = U_{R12} - U_{REF,max} = 10 - 3,5 = 6,5 \text{ V} \quad (12.18)$$

$$\frac{U_{R1}}{U_{REF}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (12.19)$$

$$R_1 = \frac{U_{R1,min}}{U_{REF,max}} \cdot R_2 = \frac{6,5}{3,5} \cdot 5000 = 9285,71 \text{ } \Omega \quad (12.20)$$

Proud děličem bude v takovéto konfiguraci:

$$I_0 = \frac{U_{R12}}{R_1 + R_2} = \frac{10}{5000 + 9285,71} = 699 \text{ } \mu\text{A} \quad (12.21)$$

Maximální napětí U_{REF} :

$$U_{REF,max} = I_0 \cdot R_{2,max} = 0,699 \cdot 5000 = 3,499 \text{ V} \quad (12.22)$$

Návrh bočníku

Velikost bočníku je požadována od výrobce driveru $0,11 \text{ } \Omega < R_{NF} < 0,5 \text{ } \Omega$ [14]. Je zvolena s ohledem na maximální fázový proud driveru:

$$I_{f,max} = \frac{U_{REF}}{5 \cdot R_{NF}} \quad (12.23)$$

$$R_{NF} = \frac{U_{REF}}{5 \cdot I_{f,max}} = \frac{3,5}{5 \cdot 1,6} = 0,4375 \text{ } \Omega \quad (12.24)$$

Ztrátový výkon na bočniku při maximálním proudu:

$$\Delta P = R_{NF} \cdot I_{f, stř, max}^2 = 0,4375 \cdot 2^2 = 1,75 \text{ W} \quad (12.25)$$

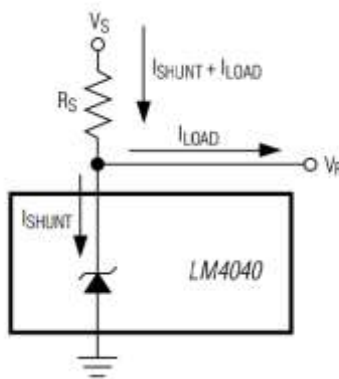
Zvolený rezistor 0,4 Ω / 2 W pouzdro 2512.

Maximální fázový proud driveru při zvoleném bočniku:

$$I_{f, max} = \frac{U_{REF}}{5 \cdot R_{NF}} = \frac{3,5}{5 \cdot 0,4} = 1,75 \text{ A} \quad (12.26)$$

Napěťová reference

Pro vytvoření stabilní napěťové reference je použit dvoj vývodový integrovaný obvod TI LM4040, jehož vlastnosti se přibližují k vlastnostem ideální Zenerovy diody. Oproti diodě je teplotně stabilnější a má strmější VA charakteristiku. Napěťová reference má hodnotu 10 V.



Obr. 59 - LM4040 referenční zapojení [15]

I_{LOAD} neboli proud odebíraný pro napájení napěťového děliče:

$$I_{LOAD, min} = 0,699 \text{ mA} \quad (12.27)$$

Napětí U_S se nebude nějak významně měnit, tudíž není třeba změnu při návrhu stabilizátoru uvažovat.

Volba R_S [15]:

$$\frac{U_{s, min} - U_R}{60\mu A + I_{load, max}} > R_S > \frac{U_{s, max} - U_R}{20mA + I_{load, min}} \quad (12.28)$$

$$\frac{12 - 10}{60 \cdot 10^{-6} + 699 \cdot 10^{-6}} = 2635,05 \Omega > R_S > \frac{12 - 10}{20 \cdot 10^{-3} + 699 \cdot 10^{-6}} = 96,62 \Omega \quad (12.29)$$

$$2635,05 \Omega > R_S > 96,62 \Omega \quad 12.30$$

Ztrátový výkon:

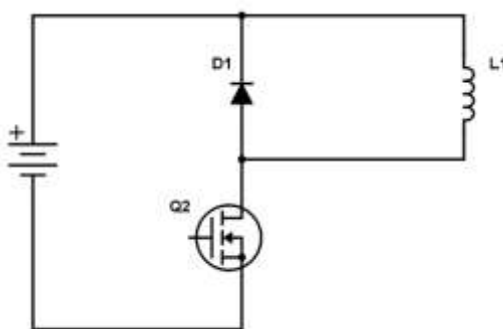
$$\frac{(12 - 10)^2}{2635,05} = 1,52 \text{ mW} > \Delta P_R = \frac{U^2}{R} > \frac{(12 - 10)^2}{96,62} = 41,4 \text{ mW} \quad 12.31$$

$$1,52 \text{ mW} > \Delta P_R > 41,4 \text{ mW} \quad 12.32$$

Zvolený rezistor $2 \times 715 \, \Omega / 100 \text{ mW}$.

12.3 Napájení topných těles

Pro FDM technologii je vedle pohonů os potřeba dalších výkonových výstupů a to především na ohřev hot endů, na ohřev nosné desky, potažmo na vyhřívání prostoru pro tisk a pro ventilátory. Regulace teplot je zajišťována pulzně šířkovou modulací výstupního napětí. Pro tyto typy zátěže se hodí použít jedno kvadrantový snižující měnič. Ve většině případů se jedná o odporový ohřev, indukčnost zátěže tudíž nebývá tak velká, aby vyžadovala použití nulové diody D1. Avšak pro ulehčení tranzistoru a pro univerzálnost koncepce je nulová dioda v měniči osazena a je dimenzována na menší proud než tranzistor.



Obr. 60 - jedno kvadrantový snižující měnič

Výkonové tranzistory není možné budit přímo z výstupních pinů procesoru, jako tomu je u interface RAMPS. Tranzistory MOSFET mají sice izolovanou řídicí elektrodu *gate*, nevyžadují tak proudové buzení jako bipolární tranzistory, avšak tato elektroda vykazuje poměrně velkou kapacitu vůči elektrodě *source*. Tuto kapacitu je nutno při zapínání a vypínání tranzistoru nabíjet a vybíjet. K tomu jsou potřeba poměrně velké špičkové proudy, které v případě buzení přímo z procesoru není možné dosáhnout a za další je to krajně nevhodné pro samotný procesor.

K buzení výkonových tranzistorů bude použit integrovaný dvoukanálový neinvertující budič MOSFET tranzistorů Microchip TC4427ACOA.



12.3.1 Dimenzování napájení vyhřívané desky

Zvolené vyhřívané desky lze napájet 12 V nebo 24 V a mají následující parametry:

- Rozměry 214×214 mm
- Jednovrstvá DPS s $35 \mu\text{m}$ tloušťkou mědi
- Odpor $1 \div 1,2 \Omega$ pro 12 V
- Odpor $3 \div 3,4 \Omega$ pro 24 V

Maximální jmenovitý proud při 24 V napájení:

$$I_n = \frac{U_n}{R_i} = \frac{24}{3} = 8 \text{ A} \quad (12.33)$$

Konstruovaná tiskárna má výrobní prostor o rozměrech 400×400 mm. Vyhřívané desky budou tedy použity čtyři. Ne vždy bude třeba při tisku využívat výrobní prostor. Proto budou 4 vyhřívané desky zapojeny do dvou okruhů, v každém okruhu budou dvě desky. Tranzistor je tedy potřeba dimenzovat na proudový odběr zátěže 16 A.

12.3.2 Dimenzování napájení vyhřívání trysek

Topné elementy hot endů se také vyrábějí s dvojnásobným napájecím napětím 12 V nebo 24 V.

Topné elementy zvolených hot endů mají parametry:

- $U_N = 24 \text{ V}$; $P_N = 25$ nebo 40 W

Maximální proud topným elementem při 24 V napájení bude:

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{40}{24} = 1,66 \text{ A} \quad (12.34)$$

12.3.3 Dimenzování napájení vyhřívání komory

Výstup pro vyhřívání komory je dimenzován na 10 A a tedy při 24 V bude schopen napájet 240 W topné těleso.

12.4 Napájení ventilátorů

Ventilátory představují neméně důležitou komponentu u FDM 3D tiskárny. Z trysky vystupující roztavený filament je nutné po nanesení na předchozí vrstvu ihned o pár stupňů ochladit. Stejně tak je potřeba zajistit chlazení studených částí extrudérů. K tomu se používají stejnosměrné ventilátory používané v PC a to hlavně díky jejich nízké ceně.

Regulace otáček ventilátorů je prováděna ne úplně optimálně regulací napájecího napětí ventilátoru, nicméně, někteří výrobci takto dovolují řízení otáček ventilátoru v omezeném rozsahu. Existují i ventilátory určené k regulaci otáček vybavené k tomu určeným vstupem, jsou ale dražší. Problémem však hlavně je, že při použití snižujícího měniče bez výstupní filtrace jsou ventilátory napájeny přímo výstupním pulzním napětím. Ventilátor neobsahuje pouze stejnosměrný elektromotor, nýbrž BLDC motor, který pochopitelně pro svoji činnost vyžaduje elektroniku. Pulzní napájení této elektroniky zřejmě způsobuje neoptimální chod ventilátoru. Experimentálně bylo zjištěno, že ventilátor je třeba napájet vysokou frekvencí PWM jinak je jeho chod doprovázen nepříjemným zvukovým doprovodem.

Pro napájení ventilátorů bude použit integrovaný obvod v kompaktním SMD pouzdře Infineon BTS716G-DS. Je to čtyřkanálový výkonový spínač s otevřeným emitorem určený ke spínání rezistivních, tak i kapacitních a induktivních zátěží. Slouží pro náhradu elektromechanických relé, pojistek a diskretních výkonových spínačů [18].

Napájecí napětí ventilátorů bývá v rozmezí $4,5 \text{ V} \div 13,8 \text{ V}$. Minimální proudový odběr potenciálně použitelných ventilátorů pro chlazení extrudérů je 100 mA. PWM spínací frekvence řídicí elektroniky 31 kHz.



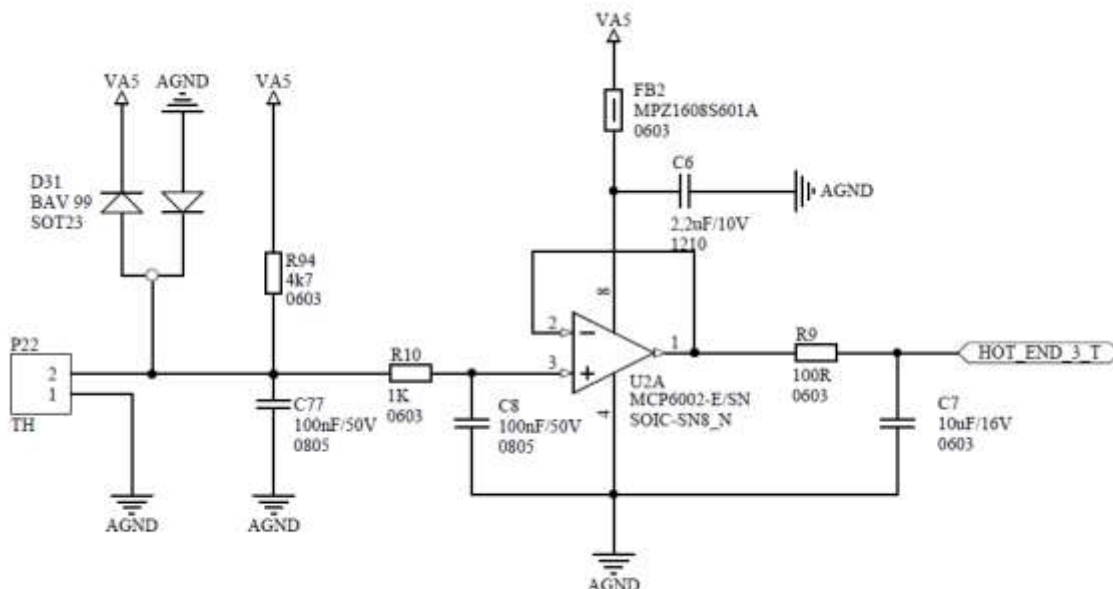
Obr. 61 - BTS716G-DS

12.5 Analogové vstupy

Analogové vstupy interface slouží pro připojení teplotních čidel za účelem regulace teplot topných těles. Jako teplotní čidla se nejčastěji používají NTC termistory s nominální hodnotou odporu 100 k Ω , méně často se pak používají 10 k Ω nebo termočlánky. Termistor je proudově napájen rezistorem R94 a informace o teplotě je obsažena v úbytku napětí na termistoru připojeného na P22. Protože termistor z principu věci mění svoji hodnotu odporu, je velikost referenčního proudu proměnná a závislost výstupního napětí na teplotě je tak silně nelineární, nehledě na vlastní nelinearitu termistoru. Ideální řešení by bylo napájet termistor zdrojem konstantního proudu. Používané firmwary však už mají zabudované převodní funkce pro dekódování teploty zahrnující i tyto nelinearity.

Obvod pro zpracování signálu z termistoru obsahuje dvě rychlé spínací diody D31 pro ochranu vstupu proti ESD výbojům. Dvě RC dolní propusti pro filtraci, jelikož vodiče od čidla budou s velkou pravděpodobností vedeny v blízkosti napájecích vodičů krokových motorů, které jsou velkým zdrojem VF rušení. Pro proudové odlehčení odporového děliče je obvod navíc doplněn

napětíovým sledovačem z operačního zesilovače MCP6002. Výstup *HOT_END_3_T* je dále veden přímo na vstupní analogový pin procesoru.

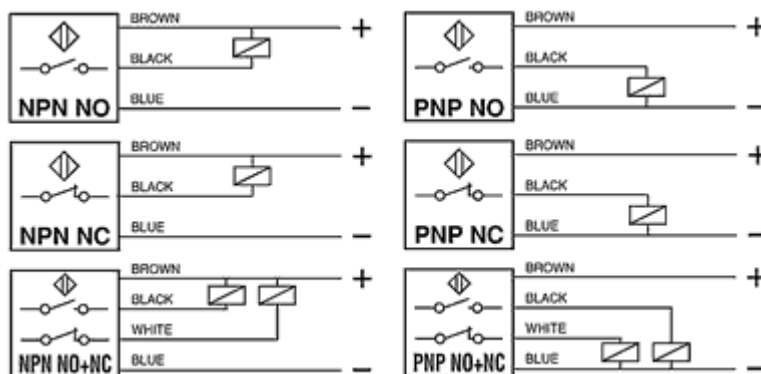


Obr. 62 – obvod analogového vstupu

12.6 Digitální vstupy

Digitální vstupy slouží k připojení dvoustavových senzorů polohy. Pro potřeby tiskárny připadají v potaz koncové spínače a snímače přítomnosti filamentu.

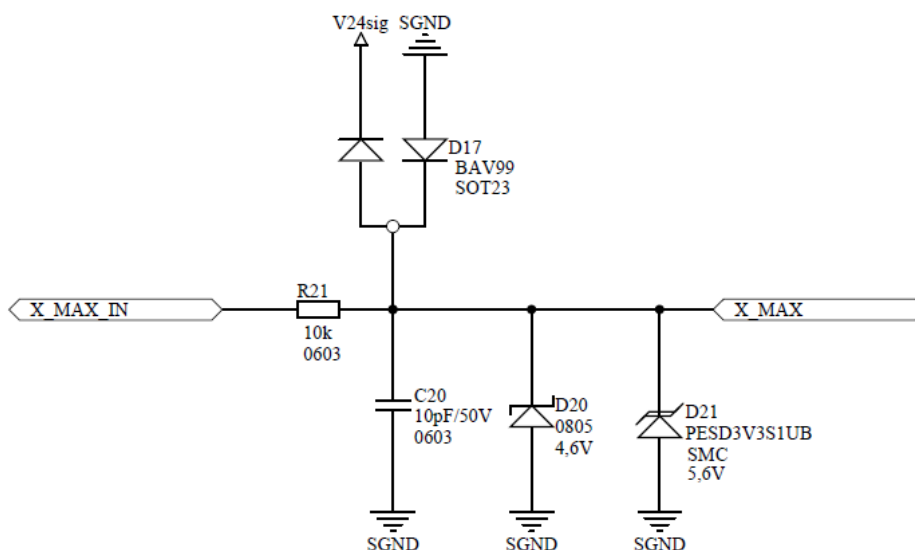
Jako koncové spínače se nejčastěji používají optické závory s binárním výstupem NC (normal close). Důležité je zde použití, jak již bylo naznačeno, čidla NC, které má v klidové poloze (tou jest koncová poloha nenastala) na svém výstupu log. 1. To je z důvodů případného odhalení poruchy čidla. Při výběru čidla je také důležité pamatovat na to, že existují typy s výstupem PNP a NPN. Při PNP je výstup spínán proti zemi, jak tomu bývá zvykem, u NPN je však výstup spínán proti kladnému napětí!



Obr. 63 - Binární snímače polohy s kombinacemi výstupů NO, NC, PNP, NPN [33]

Význam těchto polohových senzorů není však pouze jako koncové spínače. Řídicí systém díky absenci absolutního polohového čidla po zapnutí neví, v jaké poloze se aktuálně nacházejí osy. Proto se provádí procedura nazývaná „*homing*“ (z anglického *home*). Všechny osy po zapnutí najedou do nulové pozice, která je definována právě sepnutými koncovými spínači. Řídicí systém pak ví, že se osa nachází právě v bodě nula a od této pozice počítá požadovanou polohu. Toto klade na senzory sloužící k nulování polohy požadavek na co největší opakovatelnost.

Každá osa má dva koncové snímače. Jeden nulovací, na který je kladena větší přesnost a jeden skutečně jen koncový, který slouží pouze k ochraně případného havarijního stavu.



Obr. 64 - obvod digitálního vstupu

Na vstupu obvodu zpracování binárního signálu je výstup dvoustavového snímače polohy a na výstupu je pin procesoru. Obvod obsahuje dva, resp. tři ochranné prvky a filtr. Proti přepólování slouží dvojitá dioda BAV99. K ochraně proti přepětí slouží TVS dioda – součástka podobná Zenerově diodě speciálně upravená k požití velké energie (řádově stovky W pulzního výkonu), menší přesnost prahového napětí v závěrném směru, zato velký nárazový proud. Klasická Zenerova dioda D20 v obvodu má sekundárně taky ochrannou funkci stejně jako TVS dioda, její primární funkce však je společně s rezistorem R25 tvořit omezovač napětí digitálního vstupu v případě použití 12 V senzoru. Rezistor R25 navíc společně s C23 tvoří dolní propust kvůli filtraci. Časová konstanta propusti je 100ns, tudíž nějak nepokazí kvality signálu z koncového snímače.

12.7 Modul LCD displeje s ovládáním

Pro snadné nastavování konstant tiskárny a hlavně také pro možnost tisku bez použití hosta bude k CPU připojen modul s LCD, ovládacími prvky a portem pro SD kartu. Již existuje několik různých verzí LCD modulů. Některé disponují řádkovým displejem, jiné grafickým. Moduly také obsahují rotační enkodér s tlačítkem, port pro SD kartu a bzučák pro zvukovou signalizaci. Většina těchto modulů má již standardizované rozhraní pro připojení. Displej bývá z pravidla řízen po sériové komunikační sběrnici SPI nebo I²C, stejně tak SD karta komunikuje s CPU po SPI sběrnici.




Obr. 65 - FULL GRAPHIC SMART CONTROLLER s grafickým displejem 128×64 [10]


12.8 Podružné napájecí zdroje pro elektroniku

Protože je interface navržen na napájecí napětí 24 V, je nutné realizovat napájecí zdroj s menším stabilizovaným výstupním napětím, pro buzení tranzistorů optimálně 12 V. Z tohoto zdroje pak bude napájena CPU deska, koncové snímače, budiče výkonových tranzistorů a ventilátory. V případě napájení interface z 12 V, bude možné pomocí hardwarové propojky tento zdroj přemostit a vůbec ho neosazovat. Dvojnásobný rozdíl výstupního a vstupního napětí znamená již dost velkou výkonovou ztrátu v případě samotného lineárního stabilizátoru, proto je zvolen spínaný regulátor napětí LM2679S-12 od Texas Instruments. Integrovaný obvod realizuje snižující jedno kvadrantový měnič včetně řídicí logiky a regulace, spínacího tranzistoru a ochranných obvodů. Jeho aplikace vyžaduje minimální množství dalších doplňujících obvodových součástek jako výstupní tlumivku, spínací diodu, kondenzátory a rezistory pro nastavení proudového omezení apod.

Pro napájení CPU desky je vyžadováno napětí 7 V - 12 V. Napájecí napětí mikrokontroléru je 5 V, k tomu je na CPU desce osazen lineární 5 V stabilizátor, který však při tomto rozdílu napětí je schopen poskytovat pouze 400 mA. Což je poměrně málo v případě, že budou z této napěťové hladiny napájeny všechny obvody popsané výše. Proto tento stabilizátor nebude využíván a veškeré 5 V napájení bude zajišťovat výkonnější lineární stabilizátor LM1085ISX-5.0 umístěný na navrhovaném interface.

LM2679S-12	
<i>LM2679 SIMPLE SWITCHER® 5A Step-Down Voltage Regulator with Adjustable Current Limit</i>	
<p>Spínaný regulátor napětí 12 V</p> <p>$\eta = 92 \%$</p> <p>$U_{in,max} = 45 \text{ V}$</p> <p>$I_{out} = 5 \text{ A (7 A peak)}$</p> <p>$f_{PWM} = 260 \text{ kHz}$</p> <p>Pouzdro: TO-262-7 D²PAK-7</p>	

Tabulka 10 - parametry spínaného regulátoru napětí LM2679

LM1085ISX-5.0	
<i>LM1085 3-A Low Dropout Positive Regulators</i>	
<p>Lineární regulátor napětí 5 V</p> <p>$\Delta U_{max} = 25 \text{ V}$</p> <p>$I_{out} = 3 \text{ A}$</p> <p>Pouzdro: TO-262-3 D²PAK-3</p>	

Tabulka 11 - parametry lineárního regulátoru napětí LM1085

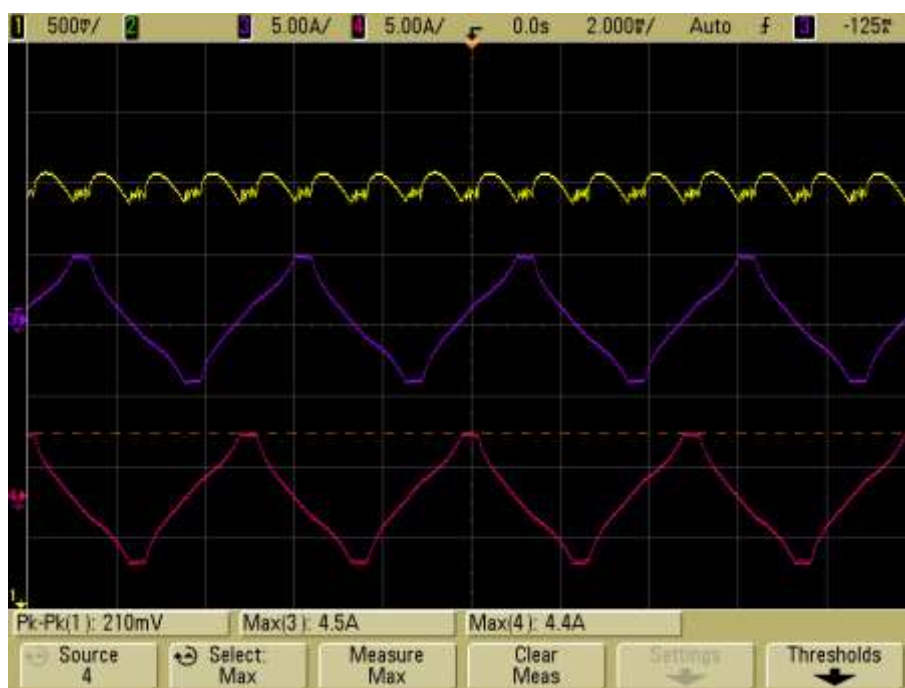
13 TESTOVÁNÍ VYROBENÉ ELEKTRONIKY

Pro ověření funkčnosti a správnosti návrhu výkonové elektroniky byly jednotlivé moduly otestovány při provozu na plný výkon.

13.1 Měření pohonů

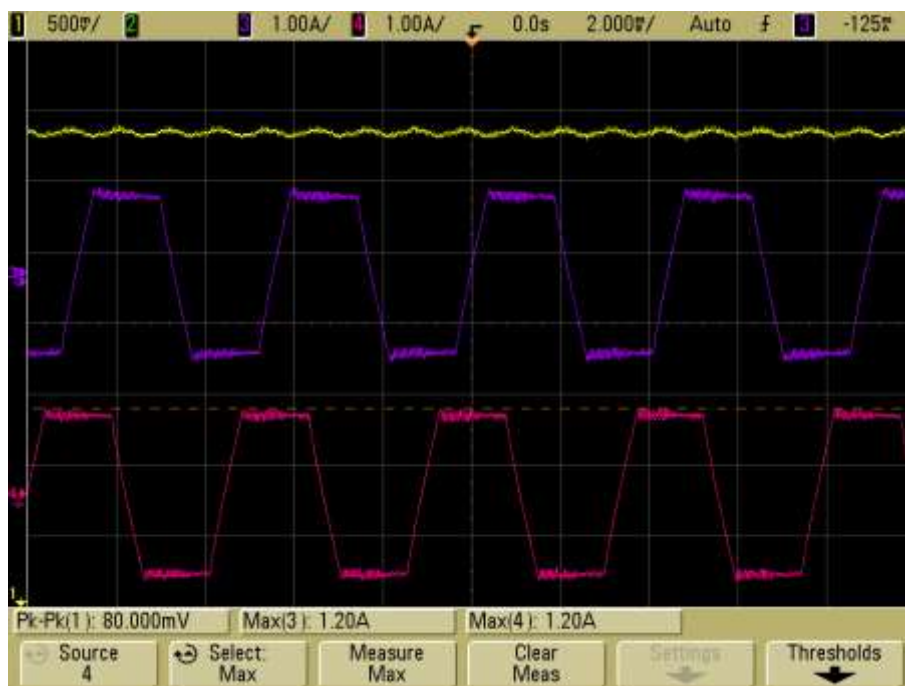
Pro ověření správnosti elektrického návrhu modulů pohonů byla provedena následující měření:

- Ustálené oteplení chladiče při provozu na plný výkon
- Ověření tvaru proudu pomocí proudových sond
- Zvlnění napětí na napájecím pinu integrovaného obvodu
- Správnost regulace fázového proudu



Obr. 66 - měření pohonů os; žlutá - napětí na napájecím pinu int. obvodu; fialová, růžová - fázové proudy motoru

Jak je patrné z oscilografického záznamu, zvlnění napětí na napájecím pinu integrovaného obvodu je 210 mV, což je 1 % z napájecího napětí 24 V.



Obr. 67 - měření pohonů extrudérů; žlutá - napětí na napájecím pinu int. obvodu; fialová, růžová - fázové proudy motoru

Zvlnění napájecího napětí driveru extrudérů při proudu 1,2 A, tedy větší polovině jmenovitého proudu je 80 mV, což je daleko méně než jedno procento.

13.2 Výkonové tranzistorové spínače

Pro napájení topných těles jsou použity výkonové MOSFET tranzistory ve spínacím režimu. K jejich buzení je použit integrovaný obvod TC4427. Tranzistory jsou v SMD pouzdře DPAK, chlazení tedy probíhá odvodem tepla do DPS. Pro ověření správnosti návrhu spínačů připadá v úvahu zejména ověření tepelného návrhu chladicí plochy polygonu na desce plošných spojů a ověření činnosti budiče. K tomu byla použita v laboratoři elektronická zátěž, pomocí které se simuluje proudový odběr vyhřívané nosné desky, která představuje nejvýkonnější uvažovanou zátěž. Teplota pouzdra tranzistoru je měřena kontaktně pomocí termočlánku. Druhým potenciálně ověřitelným dějem je buzení hradla tranzistoru, který je v tomto případě buzen správně s použitím budiče MOSFET tranzistorů včetně předepsaného odporu R_G , oproti interface RAMPS.



Výsledky měření:

Napětí 24 V, proud zátěže 16 A

Ustálená teplota pouzdra: **43 °C**
(Dovolená teplota pouzdra: více jak 150 °C při 20 A)

Budící napětí $U_{GS} = 12 \text{ V}$

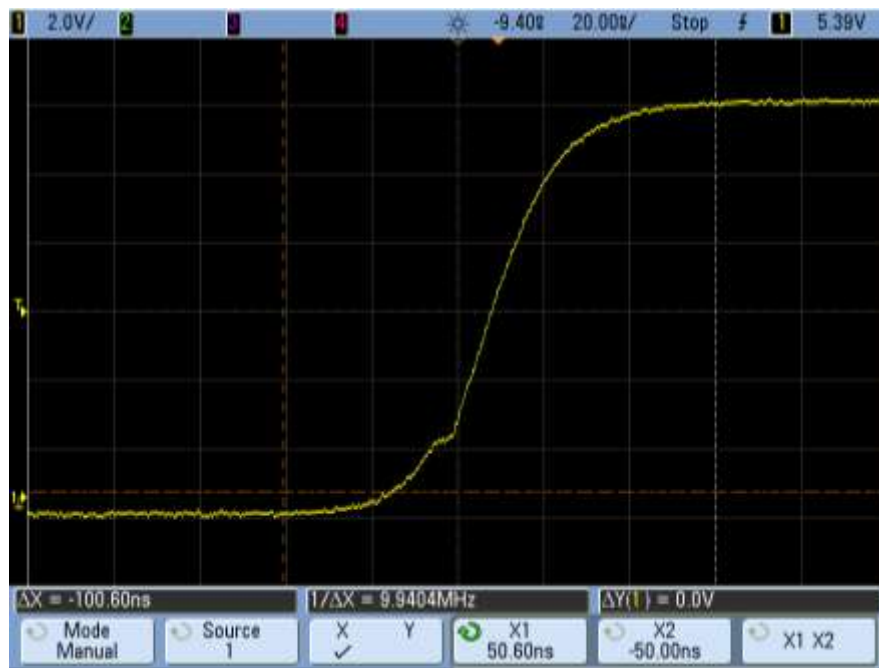
Napětí $U_{DS} = 42,1 \text{ mV}$

Ztrátový výkon:

$$\Delta P_T = U_{DS} \cdot I_{DS} = 42,1 \cdot 10^{-3} \cdot 16 = \mathbf{0,67 \text{ W}}$$

Odpor na dráze *drain – source*:

$$R_{DS} = \frac{U_{DS}}{I_{DS}} = \frac{42,1 \cdot 10^{-3}}{16} = \mathbf{2,6 \text{ m}\Omega}$$



Obr. 68 – záznam průběhu napětí U_{GS} při spínání tranzistoru

Na Obr. 68 je uveden záznam děje nabíjení hradla osazeného výkonového tranzistoru. Kapacita hradla vybraného tranzistoru IRLR8743 je 4880 pF. Schopnosti budiče uváděné výrobcem v datasheetu jsou: 1000pF za 35 ÷ 45 ns při 18 V napájení.

Tomu odpovídá strmost nárůstu napětí při 1000 pF:

$$s_1 = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{18}{40 \cdot 10^{-9}} = 0,45 \text{ V} \cdot \text{ns}^{-1} \quad (13.1)$$

Chování proudu kondenzátorem je popsáno vztahem:

$$i = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (13.2)$$



Z kteréhož se dá vyjádřit vztah pro strmost nárůstu napětí na kapacitě při nabíjení konstantním proudem:

$$\frac{I}{C} = \frac{\Delta u}{\Delta t} = s \quad (13.3)$$

Je patrné, že strmost je přímo úměrná nabíjecímu proudu a nepřímo úměrná velikosti nabíjené kapacity. Tedy, při kapacitě tranzistoru IRLR8743 4880 pF bude strmost nárůstu napětí menší v poměru 1000 pF ku 4880 pF.

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (13.4)$$

$$s_2 = \frac{C_1}{C_2} \cdot s_1 = \frac{1000}{4880} \cdot 0,45 = \frac{1}{4,88} \cdot 0,45 = 0,0922 \text{ V} \cdot \text{ns}^{-1} \quad (13.5)$$

Teoretická doba nabíjení hradla tranzistoru IRLR8743 je pak:

$$\Delta t = \frac{\Delta U}{s_2} = \frac{12}{0,0922} = 130,133 \text{ ns} \quad (13.6)$$

Z měřících kurzorů v dolní části *Obr. 68 – záznam průběhu napětí U_{GS} při spínání tranzistoru* je patrné, že doba zapnutí je zhruba 100 ns, což odpovídá teoretickému předpokladu uvedeného výše. V průběhu je i v čase 35 ns patrná „pomlka“, která je při zapínacím ději tranzistorů MOSFET charakteristická. Oproti provedení kritizovaného interface RAMPS, kde je tranzistor buzen výstupním pinem procesoru s časem 700 ns, a podivným průběhem napětí U_{GS} viz 8.4.1 *Interface RAMPS* se již dá hovořit o správném způsobu buzení unipolárního tranzistoru.



ZÁVĚR

Diplomová práce na téma 3D tiskárna se zabývala především návrhem hardwaru řídicí elektroniky 3D tiskárny. K proniknutí do této oblasti byla zpočátku provedena rešerše na téma technologie 3D tisku. Tato kapitola slouží především k osvojení přehledových znalostí o všech známých technologiích, které se v dnešní době používají. Pro konstruovanou tiskárnu byla díky své rozšířenosti a technologické jednoduchosti zvolena technologie Fused Deposit Modeling. O této technologii pak byl proveden podrobnější rozbor. Protože velmi důležitým momentem pro rozšíření technologie 3D tisku a především FDM byl projekt RepRap, další kapitola je věnovaná právě jemu. Dále jsou popsány varianty řídicích systémů nízkonákladových tiskáren, včetně postupu krok za krokem nezbytných pro úspěšný tisk. Hluběji je pak rozebrána teorie týkající se pohonů CNC strojů, mezi něž se v podstatě dají 3D tiskárny zařadit. Jedna kapitola je věnovaná krokovým motorům, které představují nejběžnější typ pohonů 3D tiskáren. Je zde rozebrána konstrukce krokových motorů, způsoby napájení, buzení, jsou popsána rizika a nezbytná opatření při použití těchto typů pohonů. Pro představu je také proveden průzkum trhu s komerčními 3D tiskárnami vyskytujícími se na světovém trhu, včetně jejich základních parametrů pro srovnání.

Po teoretické přípravě následuje praktická část práce. V rámci této části byl proveden výběr komponent tiskárny, které mají návaznost nebo souvislost s řídicí elektronikou tiskárny a jejichž výběr byl před samotným návrhem nezbytný. Řídicí platforma Arduino byla vybrána především z důvodů největší rozšířenosti v projektu RepRap, z čehož vyplývá největší kompatibilita open source řešení a největší podpora ve formě diskusních fór. Po této fázi následoval výběr elektrických komponent elektroniky. Při návrhu elektroniky byl kladen důraz na kvalitu návrhu a použitých komponent a na doplňkové funkcionality tiskárny. Oproti běžným RepRap 3D tiskárnám je naše tiskárna navržena na tři extrudéry, na využití vyhřívaného výrobního prostoru s možností regulace na konstantní teplotu. Moduly pohonů umožňují navíc s hardwarovým nastavováním fázových proudů pomocí potenciometru také softwarové nastavování pomocí digitálních potenciometrů řízených po sériové sběrnici I²C. Stejně tak nastavování mikrokrokování je umožněno jak hardwarově pomocí přepínačů, tak softwarově.

Na základě vybraných elektrických komponent elektroniky byl proveden schématický návrh v programu Altium Designer, následovaný návrhem desek plošných spojů. Desky plošných spojů byly vyrobeny podle gerber podkladů ve firmě Čemebo s.r.o. Po výrobě desek následovalo vlastnoruční osazování elektrických komponent a po osazení postupné ožívování. Nejdříve byly oživeny přídatné moduly pohonů a spínačů topných elementů, následovalo oživení napájecího zdroje na základní desce a potom postupné ožívování zbylých funkčních částí na základní desce. Posledním krokem pro ověření funkčnosti návrhu bylo provedeno testování a měření elektroniky, výsledky testování jsou uvedeny v poslední kapitole.



LITERATURA

- [1] CANESSA, Enrique (ed.), Carlo FONDA (ed.) a Marco ZENNARO (ed.). *LOW-COST 3D PRINTING FOR SCIENCE, EDUCATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT*. 1. Terst Itálie: ICTP—The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013. ISBN 92-95003-48-9.
- [2] *Additively: 3D printing platform for professionals* [online]. Zürich, Switzerland [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: <https://www.additively.com/>
- [3] *PK model* [online]. Praha [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3dtisk.html>
- [4] *3D wiser: Svět 3D tisku* [online]. Praha [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: <http://www.3dwiser.com/o-3d-tisku/>
- [5] *Rapid Prototyping* [online]. 2000 [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/main06.html>
- [6] *3D-tisk cz: Aditivní výroba a Rapid prototyping* [online]. Brno [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/>
- [7] *3D Printer Pro: 3D Fabrication for World Transformation* [online]. Gold River, California, USA [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: <http://www.3dprinterpro.com/digital-light-processing/>
- [8] *Texas Instruments: TI DLP® technology overview* [online]. [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lscs/ti/dlp-technology/about-dlp-technology/overview.page>
- [9] *Pwc* [online]. [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: <http://www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/3d-printing/features/assets/th-feature01-figure03.jpg>
- [10] *RepRap wiki: encyklopedie* [online]. [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: <http://www.reprap.org/>
- [11] Prezentace, Schnider Electric. *Motor basic: Motion & drivers training*. 2. 2008.
- [12] KLÍMA, Bohumil. *Mikroprocesorové řízení elektrických pohonů*. 1. Brno, 2014, 89 s.
- [13] TOSHIBA. *TB6600 datasheet: TOSHIBA BiCD Integrated Circuit Silicon Monolithic*. 1. 2014, 36 s.
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. *DRV8824 datasheet: DRV8824 Stepper Motor Controller IC*. 1. 2014, 36 s.
- [15] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, INC. *LM4040 datasheet: Improved Precision Micropower Shunt Voltage Reference with Multiple Reverse Breakdown Voltages*. 8. San Jose, California, USA, 2013, 15 s.
- [16] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014, 684 stran. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [17] KOLACNY, Josef. *Elektrické mikropohony*. Brno, 173 s. Skriptum. VUT FEKT.



-
- [18] INFINEON. *Datasheet BTS716: Smart High-Side Power Switch*. 1. 2007, 16 s.
- [19] FAULHABER GMBH. *Stepper motors datasheet: PRECISTEP technology*. 2014, 2 s.
- [20] BANWATT, Paul. *3D Printing Law: Trademarks – Why “FDM” isn’t for Everybody* [online]. 2013 [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://lawitn.com/3d-printing-law-trademarks-why-fdm-isnt-for-everybody/>
- [21] STRATASYS INCORPORATED. *High temperature modeling apparatus*. USA. US6722872 B1. Přihlášeno 23. červen 2000.
- [22] MAGAZINE, Make. *MAKE: ultimate guide to 3D printing*. MAKE special issue. Sebastopol, CALIF: O'Reilly Media, 2012. ISBN 9781449357375.
- [23] Stratasys: *FDM Technology 3D print durable parts with real thermoplastic* [online]. USA [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>
- [24] VÍT, Tomáš. *Toshiba se pochlubila vlastním prototypem 3D tiskárny na kovy* [online]. , 1 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/toshiba-se-pochlubila-vlastnim-prototypem-3d-tiskarny-na-kovy/>
- [25] Minebea. *Microstepping, Full Step & Half Step* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.nmbtc.com/step-motors/engineering/full-half-and-microstepping/>
- [26] SIDDHARTH. *Stepper Motors: – Introduction and Working Principle* [online]. 2013, , 5 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://embedjournal.com/stepper-motors-introduction-and-working-principle/>
- [27] BUDIMIR, Miles. *Microstepping myths* [online]. Machine Design, 2003, , 5 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://embedjournal.com/stepper-motors-introduction-and-working-principle/>
- [28] Minebea. *Torque and speed relationship* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.nmbtc.com/step-motors/engineering/torque-and-speed-relationship/>
- [29] AV plastics: *3D printing history* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.avplastics.co.uk/3d-printing-history>
- [30] GITHUB.com: *Marlin repository* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin>
- [31] FORMÁNEK, Josef. *Tvorba grafické vizualizace principu krokového motoru a jeho řízení: Výukové texty* [online]. [cit. 2016-05-12]. Výukové texty. Západočeská univerzita v Plzni.
- [32] MICROCON. *Momentové charakteristiky řady SX16, SX17, SX23* [online]. , 2 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.microcon.cz/pdf2015/22-23.pdf>
- [33] FARGO CONTROLS, INC. *OPERATING PRINCIPLES FOR INDUCTIVE PROXIMITY SENSORS* [online]. , 3 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.fargocontrols.com/sensors/inductive_op.html

PŘÍLOHY

A. Modul pohonu os



Obr. 69 - příloha A - modul pohonu os

B. Modul pohonu extrudéru



Obr. 70 - příloha B - modul pohonu extrudérů

C. Modul výkonových spínačů



Obr. 71 - příloha C - modul výkonových spínačů

D. Modul vstupů pro senzory



Obr. 72 - příloha D - modul vstupů pro senzory

E. Základní deska



Obr. 73 - příloha E - základní deska

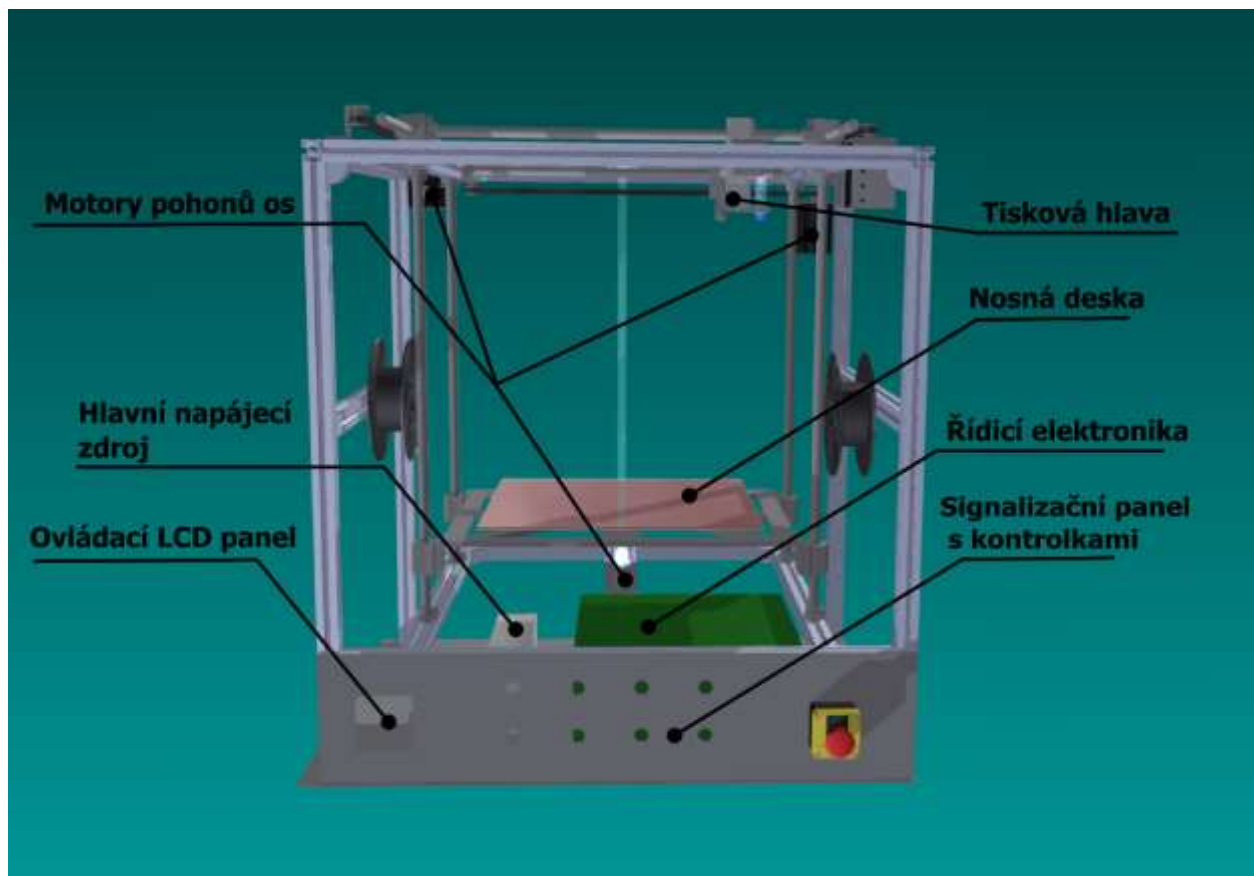
F. Kompletní podoba sestavené elektroniky



Obr. 74 - příloha F - kompletní podoba sestavené elektroniky

G. Přední pohled 3D modelu tiskárny

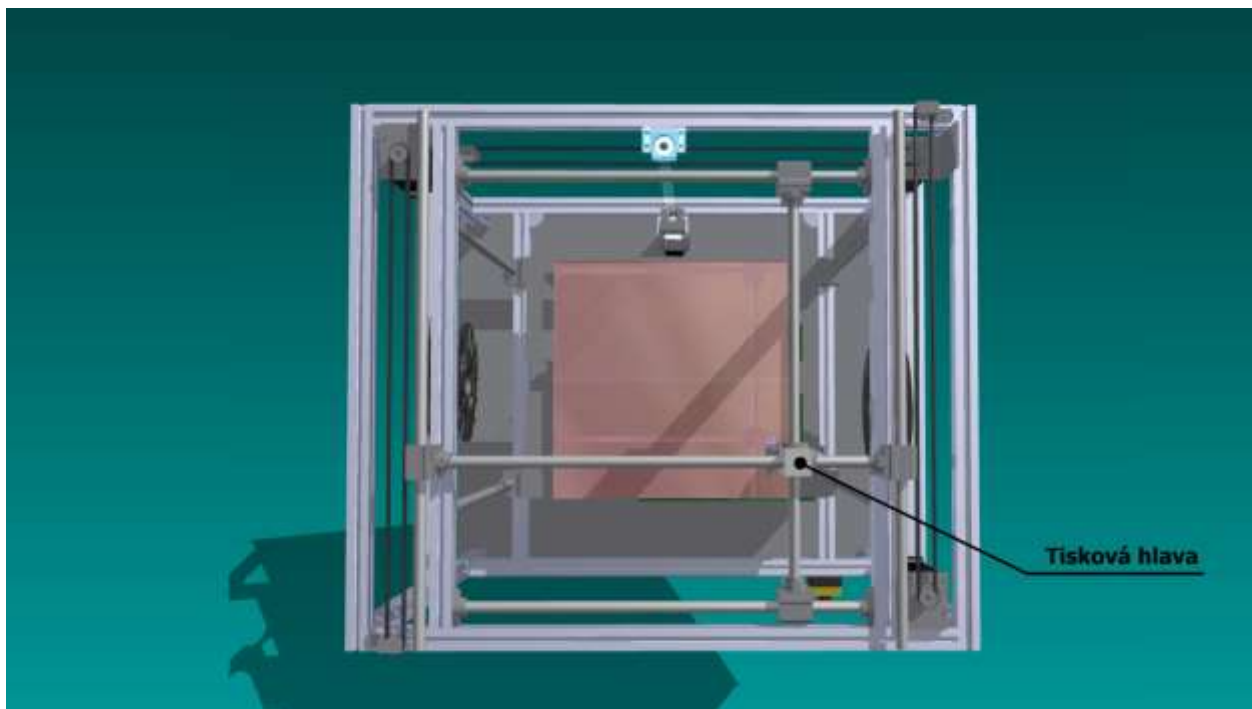
Na následujícím obrázku je 3D model konstruované tiskárny. Tento 3D model není prací autora diplomové práce, byl vytvořen studentem Fakulty strojního inženýrství pracujícím na stejném projektu.



Obr. 75 - příloha G - přední pohled na 3D model tiskárny

H. Vrchní pohled 3D modelu tiskárny

Detailní pohled na kinematiku os X a Y.



Obr. 76 - příloha H - vrchní pohled na 3D model tiskárny